

Guide pour l'identification des seuils d'alertes aux canicules au Canada basés sur les données probantes

Philippe Gachon, ESCER/UQAM

Marie Raphoz, ESCER/UQAM

Guillaume Dueymes, ESCER/UQAM

Sharon Jeffers, MSC/ECCC

Louise Bussières, MSC/ECCC

Ray Bustinza, INSPQ

Denis Gosselin, MSC/ECCC

Abderrahmane Yagouti, Santé Canada

Pierre Gosselin, INSPQ

Philippe Martin, MSC/ECCC

Sylvain Labrecque, MSC/ECCC

Septembre 2016

UQAM

Guide pour l'identification des seuils d'alertes aux canicules au Canada basés sur les données probantes

Philippe Gachon, ESCER/UQAM

Marie Raphoz, ESCER/UQAM

Guillaume Dueymes, ESCER/UQAM

Sharon Jeffers, MSC/ECCC

Louise Bussières, MSC/ECCC

Ray Bustinza, INSPQ

Denis Gosselin, MSC/ECCC

Abderrahmane Yagouti, Santé Canada

Pierre Gosselin, INSPQ

Philippe Martin, MSC/ECCC

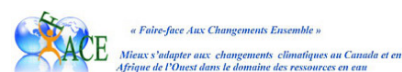
Sylvain Labrecque, MSC/ECCC

Septembre 2016



UQÀM | **Université du Québec
  Montréal**

**Institut national
de santé publique**
Québec



Environnement et
Changement climatique Canada

Environment and
Climate Change Canada



Santé
Canada

Health
Canada

Guide pour l'identification des seuils d'alertes aux canicules au Canada basés sur les données probantes

OBJECTIFS

Ce guide a pour objectifs d'identifier les seuils d'alertes aux canicules au Canada en se basant sur les données probantes, une problématique importante dans le contexte des changements climatiques, et de proposer une approche permettant de mieux définir les canicules dans le contexte climatique canadien afin de réduire les risques pour la santé humaine et ainsi contribuer au bien-être de la population canadienne.

FINANCEMENT

Le présent guide a été rendu possible par un financement de Santé Canada et de l'INSPQ dans le cadre d'une entente de collaboration technique. Merci aussi à Environnement et Changement climatique Canada (entente de contribution pour le projet IRIACC-FACE¹) et au Fonds vert du gouvernement du Québec qui ont aussi contribué en partie à ce financement.

AUTEURS

Philippe Gachon, ESCER/UQAM
Marie Raphoz, ESCER/UQAM
Guillaume Dueymes, ESCER/UQAM
Sharon Jeffers, MSC/ECCC

Louise Bussières, MSC/ECCC
Ray Bustinza, INSPQ
Denis Gosselin, MSC/ECCC
Abderrahmane Yagouti, Santé Canada

Pierre Gosselin, INSPQ
Philippe Martin, MSC/ECCC
Sylvain Labrecque, MSC/ECCC

REMERCIEMENTS

Nous sommes reconnaissants envers Environnement et Changement climatique Canada (ECCC), plus précisément le Service Météorologique du Canada (SMC), le Centre d'étude et Simulation du Climat à l'échelle Régionale (ESCER) de l'Université du Québec   Monr al (UQAM), l'Institut National de la Santé Publique du Québec (INSPQ) et Santé Canada (SC), pour leur soutien et leur contribution. Nous remercions également le Dr. Dan McKenney du Service Canadien des Forêts (Ressources Naturelles Canada) pour l'accès aux données sous forme de grille (ANUSPLIN) pour le Canada, le NTSG (Numerical Terradynamic Simulation Group) de l'Université du Montana pour l'accès aux données Daymet et le NCAR/UCAR (National Center for Atmospheric Research/University Corporation for Atmospheric Research) pour celles du North American Land Data Assimilation System (NLDAS) aux  tats-Unis. Finalement, nous remercions la composante nord-américaine du projet CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) pour les données de simulations de différents modèles régionaux du climat, incluant nos collègues du centre ESCER à l'UQAM, la Dr. Laxmi Sushama et Katja Winger.

Ce rapport a bénéficié de commentaires et de révisions très pertinentes qui ont permis d'en améliorer le contenu. Parmi les différents chercheurs  ouvrant à la fois dans le domaine du climat et de la santé, nous remercions ainsi le Dr. Tarik Benmarhnia (Université McGill), la Dre Catherine Calmet (Météo-France, France), le Dr. René Laprise (UQAM/ESCER), et le Dr. Éric Lavigne (Agence de la santé publique du Canada).

REMARQUES

Toutes les informations scientifiques contenues dans le présent document sont issues de documents et d'évaluations, publiés ou non, et d'articles révisés par des pairs, y compris ceux mis en ligne par les ministères fédéraux ou par des organismes du gouvernement fédéral canadien, et du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

CRÉDIT PHOTOGRAPHIE PAGE DE GARDE

Guillaume Pelletier

COMMENT CITER CE RAPPORT

Gachon, P., Bussières, L., Gosselin, P., Raphoz, M., Bustinza, R., Martin, P., Dueymes, G., Gosselin, D., Labrecque, S., Jeffers, S., and Yagouti, A. (2016) Guide pour l'identification des seuils d'alertes aux canicules au Canada basés sur les données probantes. Co dit  par l'*Université du Québec   Monr al, Environnement et Changement climatique Canada, l'Institut National de Santé Publique du Québec, et Santé Canada*, Monr al, Québec, Canada, 75 p.

ISBN : 978-2-924777-01-5, format imprimé, Septembre 2016

ISBN : 978-2-924777-00-8, format PDF, Septembre 2016

¹ Le projet IRIACC-FACE (Faire-face Aux Changements Ensemble) s'inscrit dans un vaste programme canadien en matière de changements climatiques (CC): l'Initiative de recherche internationale sur l'adaptation aux changements climatiques (IRIACC). L'IRIACC est administrée par le CRDI (Centre de recherches pour le développement international), cofinancée par le CRDI, les Instituts de recherche en santé du Canada, le CRSH (Conseil de recherches en sciences humaines) et le CRSNG (Conseil de recherches en sciences naturelles et génie)  tablissant une forme de collaboration unique en son genre tant au Canada qu'à l'étranger. Le projet FACE vise à apporter un appui concret pour l'adaptation des populations vulnérables face à la variabilité et aux changements climatiques au Canada, au Maroc et au Niger. Programmé sur cinq ans (de 2011   2016) et en trois thèmes, ce projet vise également à développer des outils afin d'améliorer la santé humaine, la viabilité et la résilience des systèmes naturels et humains et favoriser le transfert, l'intégration et l'application des connaissances en matière d'adaptation aux CC.

Table des matières

Résumé exécutif	5
1. Introduction.....	7
2. État des lieux sur la terminologie et les définitions.....	9
2.1 Concepts de canicule et de temps chaud	9
2.2 Critères considérés pour définir une canicule et consensus terminologique	12
2.3 Plans d'action relatifs à la santé	15
3. Alerter les populations	17
3.1 Concept de notification précoce (en temps opportun) au SMC	17
3.2 Reconnaissance des signatures météorologiques	17
3.3 Critères d'émission des avertissements de chaleur au SMC.....	18
3.4 Prévision des canicules au SMC.....	20
3.5 Vérification des avertissements et des prévisions	20
4. Inventaire des indicateurs climatiques et biométéorologiques	25
4.1 Contexte du développement des indicateurs liés à la chaleur	25
4.1.a. Indices climatiques de canicule	25
4.1.b. Indices biométéorologiques.....	26
4.2 Canicule de 2010 en Ontario et au Québec.....	27
5. Prévision de la température de l'air dans les zones urbaines et périurbaines ...	31
5.1 Concept d'îlot de chaleur urbain (ICU).....	31
5.2 Facteurs locaux d'exacerbation de la température de l'air dans les villes	31
5.3 Approche géostatistique	32
5.4 Campagnes de mesures de la température.....	32
5.4.a. Étude de cas : Campagnes de mesures à Montréal (2013 & 2014)	33
5.4.b. Étude de cas : Évolution du dôme de chaleur le 16 juillet 2013 dans le Grand Toronto	35
5.5 Modélisation numérique urbaine à haute résolution	36
6. Considérations sur l'identification des seuils	39
6.1 Identification de paramètres météorologiques	39
6.2 Identification d'indicateurs sanitaires	39
6.3 Identification de groupes vulnérables.....	40
6.4 Analyse de l'association entre les indicateurs sanitaires et les paramètres météorologiques.....	42
7. Résumé et recommandations des auteurs	45
Références.....	47
Annexes	53

SIGLES ET ACRONYMES

CCI.....	Commission de climatologie
CDC.....	Centers for Disease Control and Prevention (États-Unis)
CLIVAR.....	CLimate and VARIability
CORDEX.....	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
CSSS.....	Centre de santé et de services sociaux
DSP.....	Direction de la santé publique
ECCC.....	Environnement et Changement climatique Canada
EPA.....	Environmental Protection Agency (USA)
ESCCER.....	Étude et simulation du climat à l'échelle régionale
ETCCDI.....	Expert Team on Climate Change Detection and Indices
GIEC.....	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IBM.....	Indicateur biométéorologique
ICU.....	Îlot de chaleur urbain
ICIU.....	Îlot de chaleur intra-urbain
INRS.....	Institut national de la recherche scientifique
INSPQ.....	Institut national de santé publique du Québec
InVS.....	Institut de veille sanitaire
MDDELCC.....	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MRC.....	Modèle régional du climat
MSA.....	Météorologiste de sensibilisation aux alertes
MSP.....	Ministère de la Sécurité publique
NCAR/UCAR.....	National Center for Atmospheric Research/University Corporation for Atmospheric Research
NLDAS.....	North American Land Data Assimilation System
NOAA.....	National Oceanic and Atmospheric Administration
NTSG.....	Numerical Terradynamic Simulation Group
NWS.....	National Weather Service
OMM.....	Organisation météorologique mondiale
OMS.....	Organisation mondiale de la Santé
PD.....	Probabilité de détection
PNE.....	Procédures normalisées d'exploitation
PNT.....	Prévision numérique du temps
RM.....	Région météorologique
RSS.....	Région socio-sanitaire du Québec
SACS.....	Système d'alerte canicule et santé
SC.....	Santé Canada
SEDI.....	Symmetric Extremal Dependence Index
SGPD.....	Système global de prévision déterministe
SHRPD.....	Système à haute résolution de prévision déterministe
SIG.....	Système d'information géographique
SMC.....	Service météorologique du Canada
SRPD.....	Système régional de prévision déterministe
STARDEX.....	STATistical and Regional Dynamical Downscaling of EXtremes for European regions
SUPREME.....	SURveillance et PRévention des Événements Météorologiques Extrêmes
TFA.....	Taux de fausses alertes
Tmax.....	Température maximale quotidienne
Tmax90p.....	Tmax ≥ 90ème percentile de la référence climatologique
Tmin.....	Température minimale quotidienne
Tmoy.....	Température moyenne quotidienne
UQAM.....	Université du Québec à Montréal
UTCI.....	Universal Thermal Climate Index

ENCADRÉS

Encadré 1. Définitions et critères pour les canicules, selon divers services météorologiques et sanitaires au niveau international et national.....	9
Encadré 2. Effets de la chaleur sur le corps humain	14
Encadré 3. Le système d'avertissement de chaleur au Québec	43

TABLEAUX

Tableau 1. Terminologie couramment (informellement) en usage au SMC, selon les saisons	11
Tableau 2. Procédures normalisées d'exploitation au SMC, concernant l'émission d'avertissements de chaleur au Canada.....	19
Tableau 3. Vérification des a) Tmax et b) Tmin prévues pour 23 villes canadiennes en 2015	21
Tableau 4. Vérification des précipitations pour 23 villes canadiennes en 2015	22
Tableau 5. Comparaison entre l'approche géostatistique et la modélisation à haute résolution	38

FIGURES

Figure 1. Tmax, Tmin et indice humidex (maximum et moyen quotidien) observés pour les stations de Montréal (McTavish) et de Toronto (Pearson) du 1 ^{er} au 31 juillet 2010. Ces stations font partie du réseau de stations d'ECCC	29
Figure 2. Valeurs du 8 juillet 2010 dans le Sud du Québec et de l'Ontario pour a) Les Tmin, b) Les Tmax et c) L'indice humidex. L'indice humidex a été calculé à partir des variables disponibles (p. ex., pression de vapeur d'eau et températures quotidiennes) issues de la base de données Daymet (Bristow et Campbell, 1984; Thornton <i>et al.</i> , 1997; Thornton et Running, 1999; Thornton <i>et al.</i> , 2014)	30
Figure 3. Distribution spatiale de la température de l'air (en °C) dans le Grand Montréal le 16 juillet 2013, 21 h (heure locale) (approche géostatistique). YUL correspond à la position de la station de l'aéroport Pierre Elliott Trudeau	33
Figure 4. Distribution spatiale de la température de l'air (en °C) le 16 juillet 2013 pour certains secteurs du Grand Montréal (mode prévisionnel).....	34
Figure 5. Distribution spatiale de la température horaire à Toronto du 16 juillet 2013 à 08 h au 17 juillet 2013 à 7 h (heure locale)	35
Figure 6. Simulation des températures de l'air (à 2 mètres, en °C) à 120 m de résolution au-dessus du Grand Montréal le 6 juillet 2008 à 11 h (heure locale).....	36
Figure 7. Simulation de l'UTCI à 250 m de résolution pour le Grand Toronto	37
Figure 8. Carte de vulnérabilité à la chaleur pour un secteur de la région de Québec	41

ANNEXES

Annexe A. Définition et calcul de l'indice humidex.....	55
Annexe B. Le système SUPREME (SURveillance et PRévention des Événements Météorologiques Extrêmes)	57
Annexe C. Climatologie (1981-2010) mensuelle des températures minimales, maximales et moyennes quotidiennes et leurs écarts types intra-mensuels (juin, juillet et août)	61
Annexe D. Climatologie (1981-2010) des canicules utilisant plusieurs définitions (cf. section 4)	65
Annexe E. Seuils d'avertissements de chaleur extrême au Québec.....	69
Annexe F. Climatologie actuelle (1971-2000) et future (2041-2070 et 2071-2100) et anomalies futures (2050s et 2080s vs 1980s) des vagues de chaleur selon les critères multivariés (issus de la classe 3 des RSS présentée au Tableau E.1, Annexe E) ..	71

Résumé exécutif

Parmi les risques de catastrophes naturelles, les vagues de chaleur sont responsables d'un grand nombre de décès, de maladies et de pertes économiques à travers le monde. Comme celles-ci augmenteront en fréquence, en durée et en sévérité dans les décennies à venir dans le contexte du changement climatique, ces événements extrêmes constituent un véritable danger pour la santé humaine. Les systèmes d'avertissement reliés à la chaleur sont donc fortement recommandés par les autorités de santé publique pour réduire les risques d'excès de morbidité et de mortalité. Ainsi, les critères d'alertes publiques fondés sur des données probantes sont nécessaires pour réduire les impacts sur la santé humaine avant et durant les vagues de chaleur extrême.

Il n'y a pas de définition universelle concernant les vagues de chaleur ou de canicules (chaleur extrême), ainsi qu'aucun consensus au sujet de la terminologie relative au temps chaud. Que ce soit d'un point de vue météorologique (prévision de un à quinze jours), climatique (du mois aux projections multi-décennales) ou dans une perspective sanitaire (surveillance des effets sur la santé à court et à moyen termes), les définitions varient selon le domaine d'expertise. Malgré les nombreuses études disponibles sur les effets des vagues de chaleur sur la santé humaine, y compris sur la morbidité et la mortalité, il n'y a également aucun seuil universel ou fixe ou indicateurs biométéorologiques utilisés uniformément dans les systèmes d'alerte basés sur les prévisions météorologiques. Afin d'être utile et pertinent, ces seuils doivent s'adapter non seulement aux conditions climatiques et météorologiques locales, mais aussi tenir compte du degré de vulnérabilité préalable de la population et également de l'exposition et de l'adaptation physiologique humaines à la chaleur.

L'objectif de ce guide est d'identifier les seuils d'alerte pour les vagues de chaleur au Canada reposant sur des données probantes, et de proposer une approche pour mieux définir les vagues de chaleur dans le contexte canadien, afin de réduire les risques pour la santé humaine et de contribuer au bien-être de la population. Ce guide est le fruit d'une collaboration entre diverses institutions publiques de recherche travaillant sur : 1) des aspects météorologiques et climatiques, soit le Service Météorologique du Canada (SMC, Environnement et Changement climatique Canada) et le centre ES-CER de l'Université du Québec à Montréal, et 2) la santé

publique, soit Santé Canada et l'Institut National de Santé Publique du Québec.

Ce guide contient tout d'abord une vue d'ensemble des définitions trouvées dans la littérature et propose un consensus sur la terminologie utilisée pour les vagues de chaleur. On y décrit ensuite le système actuel d'alertes publiques en usage au SMC, ainsi qu'un inventaire des indicateurs climatiques et biométéorologiques utilisés dans différents pays pour des applications dans la surveillance de l'état du climat et dans le domaine de la santé. Quelques méthodes pour prévoir la température de l'air à différentes échelles urbaines et périurbaines sont présentées, suivies d'un aperçu des différentes étapes pour déterminer les seuils de canicule et leurs effets sur la santé. Le guide se termine par une discussion sur les mesures et les stratégies à mettre en place afin de réduire les impacts négatifs des vagues de chaleur sur la santé humaine, et propose certaines recommandations dans le contexte canadien. Parmi celles-ci, les auteurs réaffirment la nécessité pour les seuils d'alerte et le développement de critères de chaleur-santé qu'ils soient adaptables au climat local et au contexte humain, surtout compte tenu de la forte variabilité spatiale et temporelle des conditions météorologiques et climatiques à travers le Canada. Ceci suggère que le SMC ajuste à terme ses seuils d'avertissement de chaleur aux seuils définis par les autorités sanitaires provinciales, selon les conditions locales, et définisse aussi des seuils flexibles selon la période de l'année (à la fois en termes de durée et d'intensité de chaleur). Concernant l'exposition à des conditions extrêmes chaudes, il n'y a aucun doute que les développements ultérieurs bénéficieront des améliorations apportées à des projections spatiales prenant en compte le vieillissement continu de notre population, ainsi que les prévisions météorologiques et les projections climatiques disponibles à haute résolution. Cela devrait aussi inclure les contributions de la recherche et du développement en modélisation à l'échelle urbaine et intra-urbaine. En outre, les campagnes de mesure de températures devraient être régulièrement effectuées dans les grands centres urbains, afin d'améliorer les connaissances locales et la surveillance des conditions préjudiciables de chaleur extrême. Pour ce faire, un effort concerté de collaboration entre plusieurs institutions et une diversité d'expertises seront requises, en particulier pour mettre à jour et améliorer les systèmes d'alerte sur une base régulière.

1. Introduction

Les canicules constituent un réel danger pour la santé humaine alors que celles-ci augmenteront en sévérité, en durée et en fréquence au cours des prochaines décennies dans le contexte des changements climatiques (IPCC, 2012). La décennie 2003 à 2012 a connu la plus grande occurrence d'épisodes de canicules depuis le début du 20^e siècle, notamment de 2009 à 2012 (Mishra *et al.*, 2015).

Les canicules sont, parmi les risques de désastres naturels, responsables d'un grand nombre de décès à travers le monde, comme ce fut le cas en 1995 à Chicago (Klinenberg, 2002; National Research Council, 2011), en Europe durant l'été 2003 (Hemon et Jouglu, 2004; Confalonieri *et al.*, 2007) ou en Russie en 2010 (Ryazantzev, 2011). En particulier aux États-Unis, l'exposition à la chaleur extrême aurait causé plus de 8 000 morts entre 1979 et 2010 (National Center for Environmental Health, 2013; NOAA, 2015). Durant l'été 2010, 11 000 décès additionnels ont été enregistrés en Russie par rapport à l'été précédent (Rahmstorf and Coumou, 2011; Otto *et al.*, 2012; Revitch et Shaposhnikov, 2012). En France, la canicule de 2003, la plus intense depuis 1950, a causé à elle seule environ 15 000 décès entre le 1^{er} et le 20 août (soit une augmentation de 60 % par rapport à la normale des décès; Laaïdi *et al.*, 2012). Dans ce contexte, les autorités françaises (par exemple) n'ont eu d'autres choix que de développer un plan d'alerte incluant un système d'alerte canicule et santé (SACS) (Laaïdi *et al.*, 2012).

La chaleur excessive est dangereuse partout, autant dans les pays nordiques que tropicaux, comme en fait foi la canicule de mai 2015 en Inde avec des milliers de décès (*La Presse*, 31 mai 2015). La canicule de fin juin-début juillet 2015 en Europe a déclenché en France le plan national canicule (Le Monde, 2 juillet 2015). En dépit du plan canicule (incluant le SACS), 3 300 décès supplémentaires ont été enregistrés (du 29 juin au 9 août) en France, constituant une hausse de 6,5 % (*Le Monde*, 9 octobre 2015).

Il n'existe pas de définition universelle en ce qui concerne la canicule, la chaleur extrême ou les vagues de chaleur. La plupart des définitions se réfèrent à une période de temps plus ou moins longue (plusieurs jours consécutifs) avec des conditions de temps exceptionnellement chaud qui peuvent potentiellement nuire à la santé humaine (Hayhoe *et al.*,

2004; IPCC, 2014). Plusieurs services de météorologie nationaux ont donc mis au point leur propre définition sur une base nationale ou locale. Dans la pratique, le terme canicule est appliqué à un très large éventail de conditions météorologiques, de modérées à élevées, en termes de températures diurnes surtout, ou d'autres facteurs d'occurrence conjointe comme les températures nocturnes, ou l'humidité de l'air, ou encore des épisodes de pollution atmosphérique. Les canicules sont des phénomènes relativement rares, quand on les définit comme des situations de désastre ou d'urgence, alors que des interventions de prévention des risques sanitaires doivent être menées par les services publics (Kovats et Hajat, 2008). De plus, malgré les nombreuses études disponibles sur les effets des canicules sur la santé, notamment sur la morbidité et la mortalité humaine (Aström *et al.*, 2013) et sur la morbidité ressentie (Bélanger *et al.*, 2015a), il n'existe pas de seuils universels ou d'indicateurs biométéorologiques utilisés de manière uniforme dans les systèmes d'alertes. Ces seuils, pour être utiles et pertinents, doivent en effet être ajustables selon les conditions climatiques et météorologiques locales, voire selon le degré de vulnérabilité et d'exposition des populations, et/ou selon les adaptations humaines physiologiques à la chaleur. Ces seuils d'alertes ne sont donc pas uniformes, et doivent pouvoir s'adapter au contexte climatique et humain local.

Toutefois, les critères précis et flexibles pour déterminer les risques sanitaires associés aux canicules, que ce soit dans les plans de contingence ou les systèmes d'alerte, ne sont pas nécessairement établis ou disponibles, et ne tiennent pas compte, le plus souvent, des changements démographiques, économiques et climatiques en cours. En définitive, les changements climatiques et sociodémographiques se combineront pour modifier voire aggraver le degré de vulnérabilité des populations aux cours des prochaines décennies (Kovats et Hajat, 2008; Watts *et al.*, 2015; Jones *et al.*, 2015). Ceci est en particulier le cas au Canada, une des régions du globe potentiellement les plus affectées par la hausse des températures au cours des prochaines décennies (IPCC, 2013). Au Canada comme ailleurs dans les pays industrialisés, l'exposition des populations sensibles, notamment les personnes âgées, aux vagues de chaleur s'accroît rapidement (Watts *et al.*, 2015). Dans des conditions de chaleur excessive, au-delà d'un certain seuil, chaque degré Cel-

sus supplémentaire est susceptible d'accroître la mortalité de 2 à 5% (OMS-OMM, 2012). Les risques de mortalité augmentent avec la durée de la période de chaleur intense, alors que les personnes affectées deviennent de plus en plus vulnérables (OMS-EURO, 2008; Kjellstrom *et al.*, 2008).

L'objectif de ce guide est donc de proposer une approche permettant de mieux définir les canicules dans le contexte climatique canadien, en se basant sur les meilleures données disponibles. Ceci dans le but ultime de permettre aux autorités sanitaires de réduire les risques pour la santé humaine et ainsi contribuer au bien-être de la population canadienne lors des chaleurs excessives. Ce guide s'inscrit également dans la mise en place ou l'amélioration des systèmes d'alerte santé, reliés à la chaleur excessive au niveau national et international (p. ex., OMS-EURO, 2008), à la fois à l'échelle météorologique (prévisions de quelques jours à quelques semaines) mais également à l'échelle climatique (prévisions mensuelles ou saisonnières voire projections à l'échelle décennale).

Ce document est basé sur des travaux menés principalement au Québec et, dans une certaine mesure, en Ontario et en Alberta. Cependant les concepts développés dans ce guide sont applicables aux autres provinces et territoires au Canada, par exemple dans les grands centres urbains tels Vancou-

ver ou Halifax, et dans des communautés nordiques tels le Nunavut, les Territoires du Nord-Ouest, etc.

La prochaine section (2) présente un état des lieux des définitions recensées dans la littérature et propose un consensus sur la terminologie utilisée dans le cadre de ce guide. La section 3 présente le concept de l'alerte des populations en vigueur au Service Météorologique du Canada (Environnement et Changement climatique Canada), suivie dans la section 4 d'un inventaire sur les indicateurs climatiques et biométéorologiques proposés et suggérés dans différents pays, pour des applications dans le suivi de l'état du climat et/ou dans le domaine sanitaire. La section 5 présente quelques méthodes de prévision de la température de l'air à différentes échelles urbaines et périurbaines, alors que la section 6 élabore les différentes étapes d'identification des seuils de canicules et de leurs effets sanitaires. La section 7 termine ce guide sur un sommaire des mesures et des stratégies à mettre en place pour réduire les effets dommageables des canicules sur la santé humaine, et propose un certain nombre de recommandations à cet effet dans le contexte canadien.

2. État des lieux sur la terminologie et les définitions

2.1 CONCEPTS DE CANICULE ET DE TEMPS CHAUD

Que ce soit d'un point de vue météorologique (prévisions d'un à quinze jours), climatologique (prévisions mensuelles à saisonnières, voire même des projections décennales à multi-décennales), ou sanitaire (surveillance des effets sur la santé à court et à moyen termes), il n'existe pas de consensus entourant la terminologie liée au temps chaud : les définitions varient selon le champ d'expertise. L'Encadré 1 présente un état des lieux de différentes définitions et des critères utilisés selon les spécialités (météorologique, climatologique ou sanitaire), notamment en ce qui concerne l'émission d'avis ou d'alertes de canicule.

ENCADRÉ 1. Définitions et critères pour les canicules, selon divers services météorologiques et sanitaires au niveau international et national.

ORGANISATIONS INTERNATIONALES : MÉTÉOROLOGIE, CLIMATOLOGIE ET SANTÉ

OMM (Organisation Météorologique Mondiale) et OMS (Organisation Mondiale de la Santé)

Depuis 2014, l'OMM et l'OMS partagent un bureau commun sur le climat et la santé afin d'allier les connaissances et aider à coordonner le développement et l'utilisation des services climatologiques dans une optique d'amélioration de la santé publique. Quoique l'OMS reconnaisse le manque d'uniformité en ce qui concerne la définition des canicules (WMO-No. 1142, 2015), l'OMM propose quelques définitions, soit d'ordre générique, ou soit en référence à des critères précis.

Pour l'OMM, une canicule se définit ainsi :

L'OMM propose une définition générique d'une vague de chaleur : « Réchauffement important de l'air, ou invasion d'air très chaud sur un vaste territoire ; généralement elle dure de quelques jours à quelques semaines » (Vocabulaire météorologique international, OMM-N°182).

D'autres définitions ont également été proposées sous l'égide de l'OMM, notamment dans le cadre de la commission pour la climatologie et la variabilité climatique (CCL/CLimate and VARIability (CLIVAR); Folland et al., 1999), en ce qui a trait par exemple, à la température maximale : Lorsque la température quotidienne maximale dépasse la température moyenne maximale de référence (normale établie de 1961 à 1990) de plus de 5 °C plus de cinq jours consécutifs (Heat Wave Duration Index, Frich et al., 2002).

Dans son guide le plus récent, l'OMM définit la canicule comme une période consécutive de plus de six jours où la température maximale quotidienne est supérieure au 90^e centile de référence (normale 1961-1990; Warm Spell Duration Index; Klein Tank et al., 2009).

GIEC (Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat)

Pour le GIEC (IPCC, 2013), la définition généralement acceptée de canicule (*heat wave*) repose sur deux paramètres : La chaleur (intensité sans référence à l'humidité) et la durée (sans précision du nombre de jours), nommément :

La canicule – aussi appelée événement de chaleur extrême – est une période de temps anormalement chaude. Les canicules et les vagues de chaleur (warm spell) ont plusieurs définitions et parfois leurs définitions se chevauchent. Le terme de canicule (heat wave) peut signifier différentes choses selon la formulation de l'indice en question et l'application qui en résulte (Perkins et Alexander, 2012).

PAYS : SERVICES MÉTÉOROLOGIQUES ET SANITAIRES

France

Météo-France (services météorologiques français) prévient d'une canicule lorsqu'il est prévu, pendant au moins trois jours consécutifs, des températures quotidiennes minimales au-dessus de 20 °C et des températures quotidiennes maximales supérieures à 33 °C (Laaïdi et al., 2012). Selon l'Institut de veille sanitaire (InVS) toutefois, il est préférable d'utiliser les Indicateurs biométéorologiques (IBM, cf. section 4), qui sont les moyennes glissantes sur trois jours consécutifs² des températures minimales (IBMn) et maximales (IBMx) quotidiennes, comme étant les plus pertinents pour identifier une canicule ayant un impact sur la santé en France métropolitaine.

² L'IBM du jour J est la moyenne de J, J+1, et J+2. Cf. http://www.invs.sante.fr/publications/2005/sacs_2005/rapport_sacs_2005.pdf

ENCADRÉ 1. Définitions et critères pour les canicules, selon divers services météorologiques et sanitaires au niveau international et national. (suite)

Les seuils pour caractériser une chaleur excessive varient aussi d'un endroit à l'autre, oscillant généralement entre 5 et 10 °C au-dessus de la température maximale moyenne pour l'endroit considéré. Mentionnons par ailleurs que Météo-France et les autorités sanitaires françaises utilisent les termes *canicule* et *vague de chaleur* selon le degré de vigilance requis, et les actions à entreprendre par les pouvoirs publics³.

Le SACS⁴ est un système d'alerte conçu par l'InVS avec la collaboration de Météo-France visant à faciliter la mise en place de dispositifs de prévention et d'alerte contre les risques sanitaires d'origine météorologique (Laaïdi *et al.*, 2012). Ce système, basé sur le dépassement de certains seuils établis à partir de l'analyse du lien entre les températures moyennes et la mortalité, offre des indicateurs performants dans l'identification de jours associés à une surmortalité importante.

Une étude comparative sur les mêmes jeux de données pour quatre grandes villes (Chicago, Montréal, Madrid et Londres), avec quatre types de systèmes d'alerte (classification synoptique⁵ aux États-Unis, moyennes de températures en France, température perçue en Allemagne et humidex⁶ au Canada), a montré qu'il y avait peu de cohérence entre les jours considérés à risque par les différents systèmes. Cependant, les systèmes basés sur les moyennes de températures, comme le SACS, identifient, en général, les jours associés avec les excès de mortalité les plus élevés (Hajat *et al.*, 2010).

États-Unis

Selon le **National Weather Service (NWS)**, une canicule (*heat wave*) est une période de deux jours ou plus de temps anormalement chaud, humide et inconfortable. Cette définition est basée sur les données quotidiennes de température maximale de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), qui est responsable des archives des stations météorologiques à travers le pays (NOAA, 2015).

Selon l'**Environmental Protection Agency (EPA)**, une canicule est une période prolongée de temps plus chaud et plus humide que la normale pour un lieu donné à cette période de l'année (EPA, 2006).

Pour la **Croix Rouge Américaine** (Red Cross, 2015), une canicule est une période prolongée de chaleur excessive, généralement de 5 °C ou plus au-dessus de la moyenne, souvent combinée avec une humidité excessive. Lorsqu'on anticipe une canicule, les termes suivants sont utilisés selon les circonstances :

1- Veille de chaleur extrême : Les conditions sont favorables pour un événement de chaleur excessive pouvant atteindre ou dépasser les critères d'avertissement locaux de canicule dans les prochaines 24 à 72 heures.

2- Avertissement de chaleur extrême : Les valeurs de l'indice de chaleur (*Heat Index*) sont prévues atteindre ou dépasser les critères d'alerte définis localement pendant au moins deux jours (maximums diurnes = 40-43 °C).

3- Avis de chaleur : Les valeurs de l'indice de chaleur sont prévues d'atteindre les critères définis localement pendant un à deux jours (maximums diurnes = 37-40 °C).

Australie

Une canicule est une période de temps chaud inhabituelle et inconfortable qui pourrait avoir un impact sur la santé humaine, les infrastructures de la communauté (comme l'alimentation et les transports publics) ainsi que les services. En ce qui a trait au système d'alerte, un seuil de température a été défini pour chacun des neuf districts (State Government Victoria, 2011).

Angleterre

Le système de veille de chaleur – santé (*Heat Health Watch Service*) comprend quatre niveaux basés sur un seuil maximal diurne et un seuil minimal nocturne. Ces seuils varient selon les régions, mais le seuil moyen de température est de 30 °C le jour et 15 °C la nuit, pendant au moins deux jours consécutifs (Met Office, 2015).

3 En termes de vigilance (http://vigilance.meteofrance.com/html/vigilance/guideVigilance/dm_chaud.html), en France, la *vague de chaleur* est réservée au niveau jaune; on passe en *canicule* pour les niveaux orange ou rouge. En climatologie, on parle plutôt de *vague de chaleur* car le phénomène est évalué par rapport à d'autres paramètres (on n'utilise alors pas les IBM), comme les températures, afin de permettre une comparaison sur l'ensemble du territoire.

4 Le SACS est une partie du plan national canicule. Il est activé du 1^{er} juin au 31 août et si les conditions météorologiques l'exigent, il peut être activé plus tôt et/ou maintenu au-delà du 31 août.

5 Le terme **synoptique** est utilisé en météorologie et en océanographie pour désigner les phénomènes qui se produisent à grande échelle. Plus précisément, les phénomènes de l'échelle synoptique se caractérisent par une échelle spatiale de plusieurs centaines à plusieurs milliers de kilomètres et une durée de plusieurs jours.

6 L'indice humidex est défini à l'*Annexe A*.

Comme suggéré dans le rapport du GIEC sur la gestion des risques d'événements extrêmes et de désastres (IPCC, 2012), il n'existe pas de définition unique pour un extrême climatique, y compris les canicules, les définitions variant selon les régions et les secteurs affectés (Stephenson *et al.*, 2008). La plupart des recherches sur les extrêmes reposent sur l'utilisation d'indices développés dans le cadre de différents projets ((p. ex. le projet européen STARDEX; Goodess, 2003) ou le projet ETCCDI (Zhang *et al.*, 2011)). Ces indices peuvent soit être basés sur la probabilité d'occurrence d'une variable ou d'une quantité donnée ou sur les dépassements de seuils absolus ou relatifs (par rapport à une période climatologique fixe), soit inclure des définitions plus complexes associées à la durée, l'intensité et la persistance des phénomènes météorologiques extrêmes. C'est ainsi que le terme « canicule » peut signifier des choses très différentes en fonction de la formulation de l'indice, et de l'application pour laquelle il est requis (Perkins et Alexander, 2012). Un inventaire détaillé des indicateurs climatiques et biométéorologiques reliés à la chaleur est fourni à la section 4.

Les seuils météorologiques pour caractériser une canicule varient donc d'un endroit à l'autre, mais oscillent en général entre 5 et 10 °C au-dessus de la température maximale moyenne pour l'endroit considéré (Laaïdi *et al.*, 2012). D'autres définitions ou critères varient selon les pays et n'utilisent pas forcément des critères similaires de durée (un à trois jours, voire plus) ou d'intensité (seuil absolu ou relatif des températures maximales quotidiennes, ou Tmax, voire des températures minimales quotidiennes, ou Tmin).

Au Canada, le Service Météorologique du Canada (SMC)⁷ n'émet pas d'avertissements de canicule (d'ailleurs ce terme n'est pas défini précisément au SMC). Le SMC émet plutôt des avertissements de chaleur, quand certains critères (de chaleur et/ou d'humidité) sont prévus ou observés (cf. section 3).

Bien que le SMC n'ait pas de définition formelle pour les canicules, les termes énumérés au *Tableau 1* sont généralement employés au Canada, autant par les autorités que par le public en général : La terminologie relative à des épisodes de froid ou de chaleur varie selon la saison. Ces termes servent le plus souvent à qualifier des températures anormalement élevées ou basses. Le terme canicule (chaleur extrême) est employé en été (juin-juillet-août) en raison de son origine étymologique. Ces termes et critères seront revisités dans le contexte de l'élaboration de systèmes d'alerte.

Le *Tableau 1* se veut aussi un rappel que le Canada est un pays nordique. Comme de nombreuses études suggèrent que le froid a généralement un impact plus élevé que la chaleur sur la mortalité à travers le monde (par exemple, Gasparini *et al.*, 2015), un travail similaire (seuils d'avertissement du système d'alerte en fonction de paramètres climatiques ET de la santé) devrait être mené, en ce qui a trait au temps froid.

7 SMC: Entité d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) responsable de l'émission des prévisions et avertissements météorologiques.

TABLEAU 1. Terminologie couramment (informellement) en usage au SMC, selon les saisons.											
TEMPÉRATURES ÉLEVÉES											
DOUCEUR					CHALEUR						
Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.
----- Redoux -----					----- Vagues de chaleur -----						
Canicules (Chaleur extrême)											
TEMPÉRATURES BASSES											
FROIDEUR					FRAÎCHEUR						
Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.
----- Vagues de froid -----					----- Temps frais -----						
Froid extrême											

2.2 CRITÈRES CONSIDÉRÉS POUR DÉFINIR UNE CANICULE ET CONSENSUS TERMINOLOGIQUE

L'absence de consensus sémantique nous oblige donc à établir des définitions qui seront utilisées dans ce guide. Les critères utilisés ci-après pour définir les canicules incluront les facteurs connus, selon les études disponibles qui caractérisent ces aléas climatiques et leurs incidences sur la santé humaine, dans le contexte canadien.

Les critères de définition des canicules, dans la plupart des pays ou des régions du monde, s'accordent généralement sur une durée de deux à quatre jours de conditions de chaleur excessive (selon le climat du secteur considéré), d'après des valeurs seuils de températures (seuils absolus ou relatifs). Par exemple en France, l'indicateur le plus efficace dans toutes les villes analysées s'est avéré être la combinaison des T_{min} et T_{max} moyennées sur trois jours (Laaïdi *et al.*, 2012). Le Québec a adopté un indicateur similaire, avec une pondération (cf. section 6) moindre pour le 3^e jour de la prévision (Chebana *et al.*, 2013). Plus récemment, l'Ontario (2015) et l'Alberta (2016) ont adopté une combinaison de T_{max} et T_{min} pour différents secteurs, sur une période de deux jours. Ces indicateurs sont basés sur la surmortalité historique associée à certains seuils et ont été établis par les autorités de santé publique provinciales en collaboration avec ECCC.

Nous traiterons en particulier des indicateurs sanitaires (mortalité, hospitalisation, etc.) dans la section 6, à partir des effets directs ou indirects des canicules.

Dans le contexte de ce guide, le terme **canicule** sera utilisé pour les **vagues de chaleur** apparaissant durant l'été, de juin à août. De plus, dans tous les cas, le terme anglais de «*heat wave*» sera utilisé pour la traduction de canicule **et** de vague de chaleur. On utilisera le terme «**vague de chaleur extrême**», pour les événements qui sont liés à l'atteinte de seuils liés à une surmortalité précise sachant que ce terme est bien ancré dans les publications scientifiques et est utilisé régulièrement en santé publique. Les vagues de chaleur extrême apparaissent durant les mois d'été alors que les taux d'humidité et/ou les températures nocturnes sont les plus élevés. Ces définitions sont fondées sur des critères qui sont pertinents du point de vue de la santé, et tentent de s'aligner selon l'usage le plus fréquent de ces termes au Canada.

En résumé, les définitions utilisées dans ce guide sont les suivantes :

- **Vague de chaleur (*warm spell*)** : Toute période de deux journées ou plus au cours desquelles les températures sont supérieures aux normales de saison (les normales sont établies sur une période de 30 ans, selon l'OMM).
- **Canicule (*heat wave*)** : En été (de juin à août), période au cours de laquelle la température maximale quotidienne atteint ou dépasse d'au moins 5 °C la valeur normale locale (climatologie du jour julien établie sur 30 ans), pendant une période d'au moins trois jours consécutifs.
- **Chaleur (*heat*)** : Ce terme est utilisé par le SMC dans ses avertissements météorologiques (cf. section 3). Mentionnons que la température la plus élevée jamais enregistrée au Canada (45 °C) a été observée en Saskatchewan (à Midale et à Yellowgrass), le 5 juillet 1937 (source : Environnement et Changement climatique Canada, 2015b, Les phénomènes météorologiques les plus importants du 20^e siècle).
- **Vague de chaleur extrême (*extreme heat wave*)** : Au Canada, cette expression est utilisée par certaines autorités de santé publique pour désigner une période de chaleur excessive de deux à trois jours ou plus pouvant entraîner un risque élevé d'excès de mortalité et autres impacts potentiels sur la santé.

Au Québec, lors des cinq jours de canicule en juillet 2010 (cas présenté à la section 4), un excès de mortalité quotidienne d'environ 30 % a été mesuré (Bustanza *et al.*, 2013). Le système de vigilance SUPREME⁸ a été mis en place conjointement par l'INSPQ⁹, le MSP¹⁰, et le SMC en mai 2010. SUPREME est similaire au plan d'alerte français SACS (cf. section 6), selon des seuils propres à quatre régions du Québec, identifiés d'après le risque historique de surmortalité liée à la chaleur (Chebana *et al.*, 2013). SUPREME a donc été développé afin d'orienter les autorités et les décideurs de santé publique (CSSS¹¹, DSP¹², et MSSS¹³) lors d'épisodes de canicule et il sera succinctement détaillé dans ce guide.

8 SUPREME : Système de surveillance et de prévention des impacts sanitaires des événements météorologiques extrêmes (les détails sur le système SUPREME sont fournis à l'Annexe B).

9 INSPQ : Institut national de santé publique du Québec.

10 MSP : Ministère de la Sécurité publique du Québec.

11 CSSS : Centre de santé et de services sociaux (local).

12 DSP : Direction de la santé publique (régions).

13 MSSS : Ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec.

Par ailleurs, plusieurs facteurs peuvent exacerber ou réduire à la fois la sévérité, la durée et l'occurrence des canicules mais également leurs effets sur la santé humaine. Ces facteurs peuvent être d'ordre :

- Environnemental – *liés aux conditions de surface ou aux caractéristiques physiographiques du lieu, et à la pollution de l'air;*

Les canicules sont aussi souvent synonymes de pollution atmosphérique, à cause des conditions météorologiques qui y sont associées : Anticyclone persistant, ensoleillement, température élevée, peu ou pas de vent, stabilité des couches inférieures de l'atmosphère (limitant les échanges verticaux et favorisant la stagnation de l'air près de la surface). Ces conditions aboutissent à la formation et/ou à la concentration de polluants tels que l'ozone, les particules fines et une pléiade de composés chimiques.

Pendant la canicule européenne de 2003, les conditions météorologiques ont également contribué à la création d'un épisode de pollution photochimique (par l'ozone) exceptionnel par sa durée et sa couverture géographique. Tous ces facteurs ont contribué à l'excès de mortalité enregistré en France durant le mois d'août 2003 (Cassadou *et al.*, 2004), de même que dans une bonne partie de l'Europe (Kosatsky, 2005). Il reste qu'en période de canicule, l'effet de la chaleur comme facteur explicatif de la mortalité est dominant, et l'effet lié au smog demeure mineur, soit environ 5 % (Cassadou *et al.*, 2004).

Au Québec, la canicule de 2010 a aussi été accompagnée de pollution atmosphérique due principalement aux particules fines et à l'ozone (Denis Bourque [SMC], communication personnelle, février 2015).

- Humain – *liés aux caractéristiques physiologiques, comportementales, socio-économiques ou sanitaires des personnes vulnérables et à leur degré d'exposition;*

Comme il a été mentionné précédemment, la caractérisation thermique d'une canicule est relative, car celle-ci est fonction du climat local et des conditions météorologiques, et devrait donc également refléter la vulnérabilité des populations exposées à des épisodes de grande chaleur pour laquelle elles ne sont pas acclimatées (cf. section 6). La combinaison de cette relativité spatiale et humaine fait obstacle à l'adoption d'une définition universelle.

- Météorologique et/ou climatique – *liés à l'occurrence conjointe des Tmax et Tmin, voire des conditions d'humidité, selon la période de l'année.*

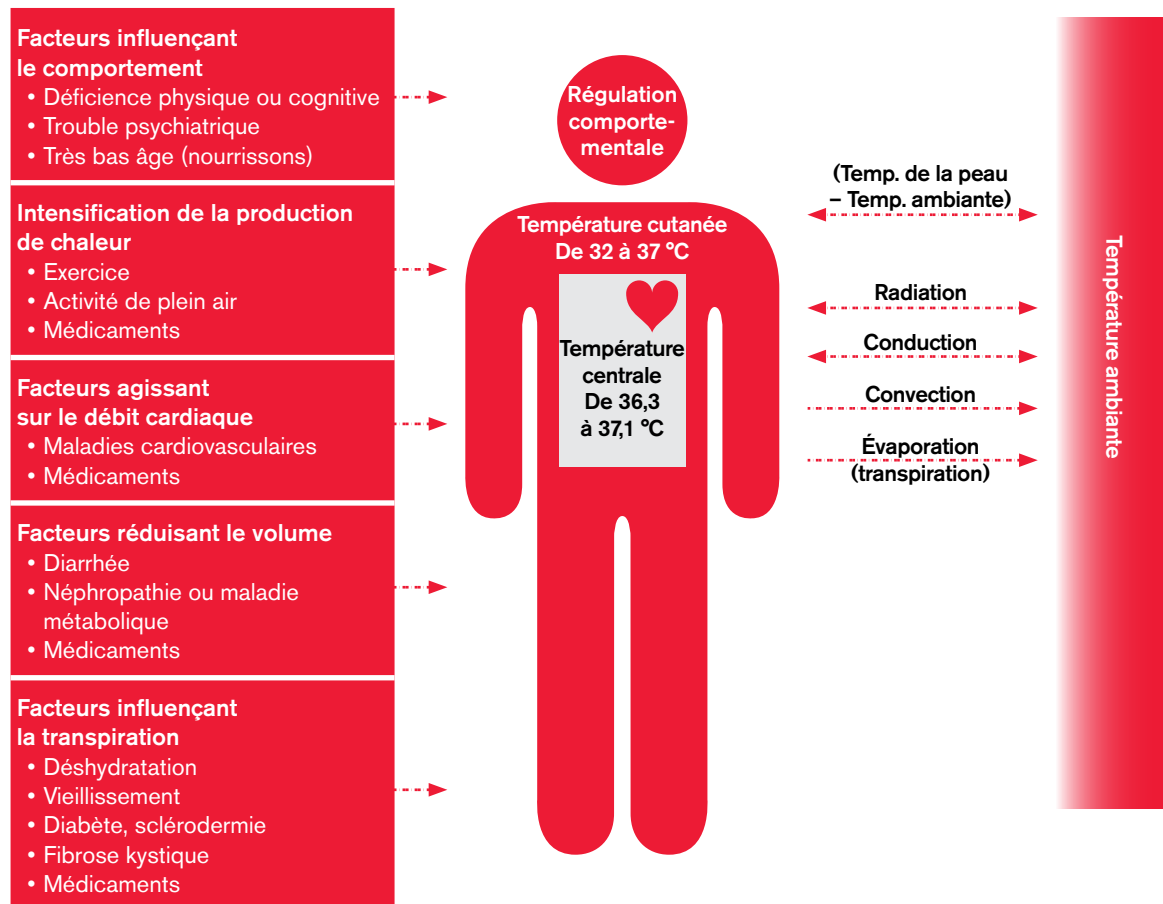
Lors de canicules, les températures diurnes sont non seulement élevées, mais celles-ci sont souvent associées à des températures nocturnes également élevées. Par exemple dans le cas de la canicule de l'été 2003 en France, les Tmax et, fait important, les Tmin, ont été les plus élevées depuis 1953 (Cassadou *et al.*, 2004).

Si la chaleur excessive est combinée à une forte humidité, le processus de régulation de température du corps humain est compromis. Étant donné que le corps humain se refroidit par l'évaporation de la sueur, un fort taux d'humidité relative de l'air ambiant rend l'évaporation de la sueur par le corps plus difficile, limitant ainsi le refroidissement cutané et donc la thermorégulation du corps humain (cf. Encadré 2).

L'humidité de l'air est considérée comme un facteur aggravant pour la santé des populations lors d'événements de canicule (Chebana *et al.*, 2013), dans la mesure où une chaleur humide est plus difficile à supporter par l'organisme qu'une chaleur sèche (Laaïdi *et al.*, 2012). C'est la raison pour laquelle, en Amérique du Nord, l'humidité relative est souvent prise en compte lors d'émissions d'avertissement de chaleur, bien que l'humidité comme telle ne fasse pas partie de la définition d'une canicule (cf. Encadré 1 et section 3). Les États-Unis utilisent l'indice de chaleur (*Heat Index*) pour émettre des avertissements de chaleur, en tenant compte de l'humidité (NOAA, 2014). Nous y reviendrons en détail à la section 4, qui présentera l'inventaire des indicateurs climatiques et biométéorologiques les plus couramment utilisés. On illustrera notamment la pertinence d'une définition de critères multivariés dans le contexte de la canicule de 2010, et selon les conditions météorologiques locales ou régionales du Sud du Québec et de l'Ontario.

ENCADRÉ 2. Effets de la chaleur sur le corps humain.

Facteurs nuisant à la thermorégulation des humains et ayant une incidence sur le risque de maladies liées à la chaleur



Adapté de Heat-health action plans, par Matthies F *et al.* Copenhague, Bureau régional de l'Europe de l'Organisation mondiale de la santé, 2008:3.

(Source : OMS, 2008)

Finalement, bien que les canicules soient généralement très étendues spatialement et affectent les populations rurales et urbaines, le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) est exacerbé durant ces périodes prolongées de chaleur extrême, notamment si elles surviennent après plusieurs jours sans précipitations (Martin *et al.*, 2015). Nous traiterons de ces phénomènes à la section 5, sachant que la mortalité est en général plus importante dans les grandes agglomérations qu'en zone rurale, en particulier du fait des ICU (Dousset *et al.*, 2011). Par ailleurs, il y a aussi des incidences de la chaleur sur la santé dans les zones rurales. Par exemple, une étude menée en Ohio a constaté que, bien que plus de personnes soient touchées dans les zones urbaines, le taux de mortalité était environ le même dans les zones rurales et urbaines (Sheridan, 2002).

2.3 PLANS D'ACTION RELATIFS À LA SANTÉ

Pour être efficace, un plan d'action canicule et santé doit être appuyé sur la capacité d'anticiper les épisodes de chaleur extrême qui sont susceptibles d'avoir un impact significatif, de sorte que les décideurs en santé publique aient le temps de mettre en place des mesures de prévention appropriées. Le plan d'action doit aussi inclure un système d'alerte, en fonction de seuils d'un paramètre météorologique (ou une combinaison de plusieurs paramètres), afin d'évaluer correctement les risques sur la santé.

Au niveau international, des plans d'action relatifs à la santé (incluant les avertissements et systèmes d'alerte) en période de canicule ont été établis dans certains pays. Parmi ces plans et documents disponibles, citons les exemples suivants :

- **En Europe** : Plans d'action sanitaire contre la chaleur (OMS-EURO, 2008), *Improving Public Health Responses to Extreme Weather/Heat-Waves—EuroHEAT: Technical Summary* (OMS, 2009). Le projet EuroHEAT est cofinancé par l'OMS et la Commission européenne, dont l'objectif est de permettre au secteur de la santé publique de mieux réagir à des événements météorologiques extrêmes et à des canicules (Matthies *et al.*, 2008);
- **Aux États-Unis** : *Excessive Heat Events Guidebook* (EPA, 2006; NOAA, 2015; Centers for Disease Control and Prevention (CDC), 2008);
- **En Australie** : *Heatwave Plan for Victoria: Protecting Health and Reducing Harm from Heatwaves* (State Government Victoria, 2011);
- **En Angleterre** : *Heatwave Plan for England: Protecting Health and Reducing Harm from Extreme Heat and Heatwaves* (Gov. UK, 2015);
- **En France** : Le SACS mis en place par l'InVS et Météo-France s'appuie sur un accord-cadre élaboré en 2012, et appliqué durant l'été 2013; le SACS permet de moduler le niveau de vigilance, établi au départ selon les conditions météorologiques (uniquement), en fonction des informations fournies sur une base continue par les autorités sanitaires et l'InVS.

Dans plusieurs pays fédérés, comme au Canada ou aux États-Unis, la responsabilité légale et l'élaboration de ces plans sont du ressort des provinces ou des états, ou encore d'autres entités administratives plus petites (villes, régions ou comtés). Les plans sont ainsi souvent adaptés aux particularités régionales et locales, ou pour certaines clientèles. Par exemple, on peut citer le guide d'intervention chaleur du Québec (MSSS, 2006), ou certains autres en usage dans les autres provinces canadiennes (Santé Canada, 2012); d'autres guides visent plutôt les travailleurs de la santé (Santé Canada, 2011) ou les travailleurs en général (Adam-Poupart *et al.*, 2012).

3. Alerter les populations

3.1 CONCEPT DE NOTIFICATION PRÉCOCE (EN TEMPS OPPORTUN) AU SMC

Le but ultime visé par un système d'alertes météorologiques se résume à la prise de décisions et d'actions de protection afin d'atténuer les impacts associés aux risques causés par les conditions météorologiques menaçantes.

Depuis environ une dizaine d'années, des partenariats formels et informels ont été établis entre Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) et différents organismes sur une base régionale, notamment l'INSPQ au Québec. En vertu de ces ententes, le SMC fournit des informations météorologiques qui permettent aux partenaires d'émettre des alertes en fonction de leurs propres critères (chaleur extrême telle que définie à la section 2) et de les diffuser aux personnes concernées (par exemple pour des besoins sanitaires; cf. Bustinza et Lebel, 2012).

Parallèlement, ECCC a aussi entrepris des travaux en collaboration avec plusieurs de ses partenaires en vue de développer une approche basée sur l'identification, la communication et la réduction du risque associé aux aléas hydrométéorologiques. Dans une telle approche, l'identification et la communication du risque s'effectuent le plus précocement possible en tenant compte à la fois de l'incertitude inhérente à toute prévision, et des capacités de réponse des organisations (par exemple, les directions de santé publique). Sur la base de pratiques exemplaires établies notamment en Europe (Laaïdi *et al.*, 2012), et de projets pilotes menés au Canada, cette approche semble la plus prometteuse pour optimiser les efforts de préparation aux canicules et ainsi réduire ultimement les impacts qui leur sont associés.

3.2 RECONNAISSANCE DES SIGNATURES MÉTÉOROLOGIQUES

Bien que le MSC n'émette pas d'avertissements de canicule, les météorologues contactent souvent les autorités sanitaires dès qu'ils détectent une « signature météorologique » (signal synoptique) propice à ce type d'événements. La signature météorologique associée aux canicules est relativement facile à reconnaître par les météorologues expérimentés à partir des modèles numériques utilisés pour prévoir le temps.

Bien que la signature puisse être identifiée près d'une semaine à l'avance, le fait demeure qu'il s'agit d'une prévision, et le début exact (ou la fin) d'un tel épisode – ou encore la température – ne peuvent être prévus avec autant de certitude qu'une prévision émise un ou deux jours avant le début de l'événement (cf. *Tableau 3*).

Puisque le signal synoptique associé aux canicules peut être détecté plusieurs jours à l'avance (en général), le SMC peut porter plus rapidement (jusqu'à une semaine de préavis) à l'attention de ses partenaires la menace qui se présente. Les différents partenaires impliqués, incluant le SMC, peuvent ensuite et de manière concertée se baser sur les principes de notification d'alerte précoce (en temps opportun) pour aviser les autorités et les populations vulnérables de façon à ce qu'elles puissent mettre en œuvre les actions nécessaires pour se préparer et/ou se protéger. Une telle approche est susceptible de réduire de manière significative les risques inhérents aux épisodes de chaleur extrême.

Bien entendu, plus le préavis (ou la notification) est précoce, plus l'incertitude que l'événement se produise, à la date et aux lieux prévus, est grande. Cependant, en mettant à jour ces préavis sur une base quotidienne, le degré d'incertitude diminue graduellement, à mesure que la date du début du phénomène se rapproche. Le SMC essaie de réduire le plus possible les fausses alertes, tout en maintenant un préavis utile pour les partenaires et la population en général. Il s'agit donc de maintenir un équilibre subtil entre la probabilité qu'un événement se produise bien à l'avance (de façon à pouvoir planifier des actions réduisant les risques) et la possibilité d'une fausse alerte, réduisant ainsi la crédibilité du messenger et la portée du message (effet « crier au loup »). Cependant, des travaux récents (Joslyn et LeClerc, 2013) ont démontré que les gens peuvent prendre des (bonnes) décisions en situation d'incertitude, quand celle-ci est exprimée de façon appropriée : Une estimation probabiliste de l'incertitude améliore la qualité de la prise de décision, en fournissant des prévisions plus crédibles, malgré les fausses alarmes occasionnelles.

3.3 CRITÈRES D'ÉMISSION DES AVERTISSEMENTS DE CHALEUR AU SMC

En ce qui a trait à la chaleur, le MSC a identifié un certain nombre de seuils de température qui, lorsque prévus ou atteints, entraînent l'émission de messages d'avertissement. Ces messages sont déclenchés pour des températures et/ou des valeurs d'indice humidex; ils sont généralement émis sans égard à la durée du phénomène (même pour seulement une heure). Récemment en Ontario (2015) et en Alberta (2016), de nouveaux critères définis et mis en œuvre en collaboration avec les autorités sanitaires incluent maintenant la durée (au moins deux jours).

Les seuils prédéterminés par le SMC sont basés sur la climatologie, c'est-à-dire que l'on tient compte de la rareté relative du phénomène, sans relation *a priori* avec les effets potentiellement néfastes sur la santé des populations. Ces seuils ont été fixés il y a quelques dizaines d'années, bien avant qu'un dialogue ne soit entamé avec des partenaires tels que Santé Canada. Peu d'attention était alors aussi accordée au phénomène d'ICU, qui a fait l'objet de nombreux travaux et de préoccupations au cours des deux dernières décennies (cf. section 5), puisque les mesures de température étaient prises surtout aux aéroports, ou encore en milieu rural, soit en des endroits peu ou pas touchés par le phénomène d'ICU.

Le *Tableau 2* définit les *Procédures normalisées d'exploitation* (PNE) officielles au SMC, régissant l'émission d'avertissements de chaleur (Critères d'alertes météo publiques, source : Environnement et Changement climatique Canada, 2014). Ces lignes directrices définissent les seuils d'avertissements régionaux et supportent le processus décisionnel des prévisionnistes du SMC, de l'émission des avertissements jusqu'à la fin de ceux-ci, pour les différentes régions du

Canada. Sauf dans le cas de la Colombie-Britannique où les secteurs couverts par le programme d'avertissement sont clairement identifiés, le *Tableau 2* peut donner l'impression que tous les secteurs dans toutes les autres provinces sont couverts par le programme d'avertissements de chaleur. En fait, les conditions de température et d'humidité requises pour l'émission d'un avertissement de chaleur ne sont jamais observées, ni prévues, dans les secteurs les plus septentrionaux des provinces, ni dans l'Extrême-Nord (Nunavik, Nunavut, Territoires du Nord-Ouest, Yukon). Cela ne signifie pas que des conditions inférieures aux seuils d'avertissements actuels ne représentent pas une menace pour les populations nordiques moins bien acclimatées à la chaleur. Éventuellement, des critères spécifiques à ces secteurs devront être déterminés, en collaboration avec les autorités sanitaires, surtout compte tenu du contexte d'un réchauffement rapide et important des régions subarctiques au cours des dernières décennies (Cohen *et al.*, 2014) et dans le futur (cf. Chapitre 11 dans IPCC, 2013), ainsi que de la vulnérabilité des populations qui y résident.

Le *Tableau 2* se base aussi sur l'hypothèse que le climat d'une province est homogène, ce qui n'est évidemment pas le cas (cf. section 4). Par exemple, au Québec, le seuil du SMC pour l'émission d'un avertissement de chaleur est le même à Sept-Îles qu'à Montréal, qui ont pourtant des climats très différents, et donc des populations acclimatées ou adaptées à des conditions différentes (notamment en ce qui a trait aux températures estivales; cf. *Annexe C, Figure C.1*). De plus, les seuils de températures présentés au *Tableau 2* ne tiennent évidemment pas compte des ICU, où les populations ne bénéficient pas du rafraîchissement nocturne qui aide les populations rurales à surmonter les épisodes de grande chaleur.

TABEAU 2. Procédures normalisées d'exploitation au SMC, concernant l'émission d'avertissements de chaleur au Canada.

RÉGION(S)	TEMPÉRATURE ET HUMIDEX (SEUILS)
Colombie-Britannique Régions couvertes : Vancouver métropolitain, vallée du Fraser, baie Howe, Whistler et Sunshine Coast	Avertissements émis lorsque : 1. On s'attend à ce que la moyenne de température du jour à 14 h (heure locale) et la prévision pour le lendemain à l'aéroport de Vancouver soit $\geq 29^{\circ}\text{C}$, ou bien : 2. On s'attend à ce que la moyenne de température du jour à 14 h (heure locale) et la prévision pour le lendemain à l'aéroport d'Abbotsford soit $\geq 34^{\circ}\text{C}$.
Alberta	Avertissements émis lorsque ces seuils sont atteints pour <u>deux jours</u> ou plus : 1. Zone sud : $T_{\text{max}} > 32^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{min}} > 15^{\circ}\text{C}$; 2. Calgary, centre, Edmonton et nord : $T_{\text{max}} > 29^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{min}} > 14^{\circ}\text{C}$.
Manitoba, Saskatchewan, T.N. O. et Nunavut	Avertissements émis lorsqu'on s'attend à ce que la température soit $\geq 40^{\circ}\text{C}$, ou que l'humidex soit ≥ 40 , et que le point de rosée soit $\geq 15^{\circ}\text{C}$.
Ontario	Avertissements émis lorsque ces seuils sont atteints pour <u>deux jours</u> ou plus : 1. Windsor-Essex-Chatham-Kent : $T_{\text{max}} \geq 31^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{min}} \geq 21^{\circ}\text{C}$ ou humidex ≥ 42 2. Sud de l'Ontario sauf Windsor-Essex-Chatham-Kent : $T_{\text{max}} \geq 31^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{min}} \geq 20^{\circ}\text{C}$ ou humidex ≥ 40 3. Nord de l'Ontario : $T_{\text{max}} \geq 29^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{min}} \geq 16^{\circ}\text{C}$ ou humidex ≥ 36 .
Québec, sauf au Nunavik	Avertissements émis lorsque l'indice humidex est ≥ 40 ou et lorsque la température est $\geq 30^{\circ}\text{C}$ ou et que ces deux conditions persistent pendant au moins une heure, ou lorsque la température est $\geq 40^{\circ}\text{C}$. <i>Note des auteurs : La température maximale jamais observée au Québec a été de 40°C à Ville-Marie (Témiscamingue), le 6 juillet 1921.</i>
Nouvelle-Écosse, Nouveau-Brunswick, Île-du-Prince-Édouard, Terre Neuve et Labrador	Avertissements émis lorsqu'on s'attend à ce que la température soit $\geq 40^{\circ}\text{C}$, ou que l'humidex soit ≥ 40 , pendant au moins une heure.

(Source : Environnement et Changement climatique Canada, 2014, et 2015a).

Note: Les nouveaux critères pour l'Ontario ont été établis en collaboration avec les autorités de santé publique et ils ont été mis en œuvre récemment (2015 et 2016). Les critères viennent d'être révisés en Alberta, avec la collaboration des autorités de santé publique, et les nouveaux seuils sont en voie d'être mis en œuvre en 2016.

3.4 PRÉVISION DES CANICULES AU SMC

Tel que mentionné précédemment, au SMC, aucun des programmes de l'organisation ne touche spécifiquement les canicules et aucune définition normalisée n'existe. Les programmes s'articulent plutôt autour des températures et de l'indice humidex (comme le suggère le *Tableau 2*), sans considération par rapport à la durée, sauf pour l'Ontario et l'Alberta.

Le SMC peut cependant porter à l'attention du public les situations de chaleur et/ou d'humidité excessives qui persisteront pendant plusieurs jours par l'entremise d'un bulletin météorologique spécial. Les météorologistes de sensibilisation aux alertes (MSA) peuvent aussi aviser directement les partenaires en santé publique de l'imminence de conditions potentiellement menaçantes. De plus, dans certaines provinces (Québec, Ontario, Manitoba, et Alberta), des ententes entre ECCC et des partenaires en santé publique permettent à ces derniers d'informer la population sur les conditions prévues ou observées de chaleur et/ou d'humidité.

La prévision des températures et de l'humidité s'appuie en majeure partie sur l'utilisation de modèles de prévision numérique du temps (PNT). Les modèles de PNT peuvent être déterministes (de 1 heure à 10 jours) ou probabilistes (de 12 heures à 16 jours). Les modèles déterministes n'offrent qu'un seul « scénario » plausible, alors que les modèles probabilistes (aussi appelées prévisions d'ensemble¹⁴) offrent plusieurs possibilités de scénarios, avec les probabilités qui leur sont associées. Nous décrivons à la section 5 les modèles déterministes en usage à ECCC.

L'expertise des météorologistes est aussi mise à contribution, particulièrement aux échelles spatiales les plus fines (par exemple, locales) et aux échelles temporelles les plus courtes (par exemple, horaires). Le processus prévisionnel peut se résumer comme suit :

→ **Cinq à sept jours avant l'arrivée d'un épisode de chaleur** (le plus souvent accompagné d'humidité) : Les prévisions numériques, particulièrement les prévisions probabilistes, permettent non seulement de détecter la « signature synoptique » du phénomène mais aussi d'évaluer l'incertitude liée à la prévision. L'expertise des météorologistes permet également de déterminer les secteurs qui seront les plus vraisemblablement touchés.

→ **Deux à cinq jours avant l'arrivée de l'épisode de chaleur** : Les modèles numériques permettent de juger de la persistance de la signature synoptique du phénomène.

¹⁴ La prévision d'ensemble est une technique de prévision météorologique dans laquelle on utilise un ou plusieurs modèles numériques de prévision plusieurs fois (pour la même période de prévision), à partir de conditions initiales différant entre elles par de petites valeurs ou petits écarts (perturbations initiales) compatibles avec les incertitudes existantes quant à la connaissance de l'état initial de l'atmosphère (cf. Palmer *et al.*, 2002).

Les prévisions probabilistes demeurent pertinentes dans la détermination du début, de la durée et de l'étendue géographique de l'évènement.

→ **Un à deux jours avant le début de l'épisode de chaleur** : Les prévisions numériques à plus court terme (généralement déterministes) sont mises à profit pour déterminer le plus précisément possible le début du phénomène, son intensité ou sa sévérité, sa durée probable et son étendue géographique.

→ **Pendant l'épisode de chaleur** : L'attention se porte principalement sur les échelles spatio-temporelles les plus fines disponibles pour déterminer le plus précisément possible les points les plus chauds, surtout en zone urbaine. Les modèles à haute résolution et les méthodes géostatistiques (cf. section 5), les analyses en temps réel et les connaissances des météorologistes sur les effets locaux permettent de raffiner les prévisions.

En plus de la température ou de l'indice humidex, le SMC prend également en considération les précipitations car celles-ci influencent la durée d'un épisode de chaleur, voire son intensité. Parfois, les averses contribuent à l'atteinte des critères pour les avertissements de chaleur via l'augmentation de l'humidité de l'air, ou au contraire, elles entraînent la fin temporaire ou permanente d'un épisode de chaleur en rafraîchissant l'atmosphère. Il n'est d'ailleurs pas nécessaire d'avoir des quantités de pluie importantes pour observer de tels effets.

3.5 VÉRIFICATION DES AVERTISSEMENTS ET DES PRÉVISIONS

Étant donné que les critères de vérification des avertissements de chaleur sont strictement limités aux températures et aux indices humidex prévus ou observés, sans égard à la durée de l'évènement (sauf en Ontario et en Alberta), on ne peut pas considérer que le SMC effectue une vérification des canicules à proprement parler. Ceci dit, les avertissements de chaleur font l'objet d'une vérification basée sur les seuils décrits au *Tableau 2*. Mentionnons aussi que les PNE exigent un préavis d'au moins 12 heures (18 heures en Ontario) avant le début de l'évènement (soit avant que le seuil d'avertissement soit atteint), pour que l'on considère cet avertissement comme un « succès », c'est-à-dire une prévision « exacte ». De plus, quelques événements majeurs (comme la canicule de juillet 2010 à Montréal, présentée à la section 4) ont fait l'objet de rapports d'analyse (*a posteriori*), mais cette pratique n'est pas systématique.

Le SMC réalise une vérification automatisée des Tmax et Tmin prévues pour 23 des principales villes au pays. Le *Tableau 3* présente pour l'année 2015 (données disponibles les plus récentes), la vérification des prévisions pour les sept

premiers jours de préavis en ce qui concerne les températures quotidiennes, (a) pour les Tmax, et (b) pour les Tmin, pour 23 villes canadiennes. L'écart de $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ utilisé pour la vérification a été déterminé par le SMC, d'après les résultats de deux sondages nationaux, menés en 2007 et en 2011 (Ekos Research Associates Inc., 2007 et 2011), et ne convient pas nécessairement à des enjeux particuliers (par exemple, des températures supérieures à $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, ou autour

de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Autrement dit, ces résultats ne fournissent qu'un aperçu des capacités actuelles de prévisions de températures en fonction du nombre de jours de préavis : Par exemple, en 2015, de juillet à septembre, la Tmax était exacte 96 % du temps (moyenne des 23 villes considérées) lorsque prévue un jour à l'avance, 93 % lorsque prévue deux jours à l'avance, etc. On présume aussi que ces résultats sont représentatifs de tout le pays, non seulement des villes considérées.

TABLEAU 3. Vérification des a) Tmax et b) Tmin prévues pour 23 villes canadiennes en 2015.

PRÉAVIS DE PRÉVISION POUR A) TMAX	POURCENTAGE (%) DE PRÉVISIONS EXACTES ($\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$) POUR 2015			
	JANVIER – MARS	AVRIL – JUIN	JUILLET – SEPTEMBRE	OCTOBRE – DÉCEMBRE
1 jour	94	94	96	94
2 jours	90	88	93	91
3 jours	81	81	89	85
4 jours	78	75	84	82
5 jours	70	71	80	76
6 jours	63	68	77	68
7 jours	56	65	71	63

PRÉAVIS DE PRÉVISION POUR B) TMIN	POURCENTAGE (%) DE PRÉVISIONS EXACTES ($\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$) POUR 2015			
	JANVIER – MARS	AVRIL – JUIN	JUILLET – SEPTEMBRE	OCTOBRE – DÉCEMBRE
2 jours	87	93	96	91
3 jours	83	90	95	87
4 jours	72	88	92	80
5 jours	63	82	87	77
6 jours	59	81	85	71
7 jours	55	77	81	66

Note: La prévision est émise un à sept jours avant les valeurs observées aux stations des villes concernées (deux à sept jours pour les températures minimales car la vérification commence avec la prévision émise à 5 h [heure locale], le matin, donc la première nuit est déjà terminée).

Comme le démontre le *Tableau 3*, on observe une diminution logique du pourcentage de prévisions exactes lorsque le préavis pour cette prévision augmente. Les meilleurs résultats (prévisions les plus précises) sont obtenus au cours des mois d'été, et sont légèrement moins fiables au cours des autres saisons (surtout de cinq à sept jours). En outre, d'une ville à une autre, les résultats (non présentés ici) varient parfois beaucoup. De manière générale, les villes dont le climat comporte moins de variabilité de jour en jour ou à l'échelle intra-mensuelle (par exemple, dans les provinces maritimes) obtiennent de meilleurs résultats de prévisions que celles dont le climat comporte de grandes fluctuations intra-mensuelles (par exemple, dans les Prairies ou le centre de l'Ontario et du Québec; cf. *Annexe C, Figure C.2*).

Un survol rapide des données de vérification pour les années antérieures indique une amélioration graduelle générale des capacités en matière de prévision de températures. Les ré-

sultats pour le Canada corroborent ceux de Météo-France, soit que la qualité des prévisions s'améliore d'un jour tous les dix ans : aujourd'hui, les prévisions à quatre jours sont aussi fiables que les prévisions à trois jours du début des années 2000 (<http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/la-prevision-du-temps/les-performances-des-previsions>). Le NWS (États-Unis) produit aussi des prévisions plus fiables qu'auparavant, alors qu'une étude démontre que la précision pour le jour 7 est maintenant égale à ce qu'elle était pour le jour 3, il y a une trentaine d'années (Novak *et al.*, 2014).

L'amélioration des prévisions résulte d'avancées scientifiques et technologiques : augmentation de la résolution des modèles, disponibilité des données satellitaires depuis le début des années 80 (Eyre, 2007), meilleure assimilation dans les modèles des données disponibles, amélioration de la formulation des modèles, et augmentation de la puissance de calcul des super-ordinateurs utilisés pour la prévision.

Si la plupart des centres météorologiques procèdent aussi à la vérification de leurs prévisions, les méthodologies et seuils utilisés varient cependant d'un pays à l'autre. Par exemple, au Royaume-Uni, les services météorologiques (Met Office) vérifient les températures selon un écart de + 2 °C entre la valeur prévue et la valeur observée (<http://www.metoffice.gov.uk/about-us/who/accuracy/forecasts>). Le NWS considère plutôt l'amplitude de l'erreur absolue moyenne (Fajman, 2011). Météo-France vérifie ses prévisions un peu sur le même principe que le NWS. Selon Météo-France, la prévision de température à 24 heures de préavis en un point donné a une précision moyenne d'environ 1 °C, alors qu'à sept jours, la précision est de l'ordre de 3 °C (<http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/la-prevision-du-temps/les-performances-des-previsions>). L'étude de Novak *et al.* (2014) donne des ordres de grandeurs comparables pour le NWS. À la lumière de ces données, il serait intéressant de connaître la précision des prévisions du SMC en termes d'écart (ou erreur) entre la prévision et l'observation.

Au SMC, l'exercice de vérification lié plus spécifiquement à la chaleur consiste à confirmer ou infirmer que les conditions météorologiques observées correspondent aux avertissements émis en fonction des critères décrits au *Tableau 2*. Contrairement à la vérification quotidienne de la qualité des prévisions, laquelle est automatisée, la vérification des avertissements de chaleur exige qu'un météorologiste effectue une analyse post-mortem de l'évènement. Cette vérification couvre aussi les situations dans lesquelles des conditions de chaleur sont observées mais n'ont pas nécessairement été prévues (événements manqués). Aussi, la vérification des avertissements se fait à l'échelle spatiale, et non pas en un

seul point comme dans le cas de la vérification automatique montrée au *Tableau 3*. Elle peut également utiliser des réseaux d'observation formels (par exemple, des entités fédérales ou provinciales comme ECCC, le MDDELCC¹⁵, etc.) ou informels (par exemple, des observateurs volontaires, *Wunderground*, etc.).

Le SMC effectue aussi une vérification automatisée des prévisions de précipitations. La procédure de vérification des précipitations est différente de celle pour les températures, étant donné que la prévision de précipitations est habituellement exprimée sous forme de pourcentage (probabilité). À titre informatif, une probabilité de précipitations de 40 % pour un territoire donné signifie que, pour la période couverte par la prévision, n'importe quel point sur ce territoire a quatre chances sur dix de recevoir au moins 0,2 mm de précipitations (valeur mesurable). Les résultats de la vérification des précipitations, comme pour la plupart des prévisions impliquant des probabilités, sont exprimés selon le Score Brier¹⁶. Le *Tableau 4* présente les résultats (Score Brier orienté positivement) de la vérification des prévisions de précipitations pour 2015 (pour les mêmes 23 villes canadiennes comme pour la température, tel que présenté au *Tableau 3*).

15 MDDELCC : Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (Québec).
 16 Le Score Brier (Brier, 1950) est probablement la mesure de vérification la plus couramment utilisée pour évaluer la précision des prévisions probabilistes (Murphy, 1973). Le score consiste en l'erreur quadratique moyenne des prévisions par rapport aux observations. Le Score Brier va de 0 pour une prévision parfaite à 1 pour la pire prévision possible (pour plus d'informations : <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/> et <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wvrp/fvr.html>). Toutefois, le SMC utilise un Score Brier orienté positivement (plus intuitif), où 1 représente une prévision parfaite, et 0 la pire prévision. Pour plus d'informations, un aperçu de la vérification de la prévision est fourni dans Casati *et al.* (2008).

TABLEAU 4. Vérification des précipitations pour 23 villes canadiennes en 2015.

PRÉAVIS DE PRÉVISION	SCORE BRIER (PRÉVISIONS DE PRÉCIPITATIONS) POUR 2015			
	JANVIER – MARS	AVRIL – JUIN	JUILLET – SEPTEMBRE	OCTOBRE – DÉCEMBRE
1 jour	.86	.90	.90	.86
2 jours	.84	.88	.88	.83
3 jours	.80	.86	.86	.80
4 jours	.78	.85	.86	.79
5 jours	.77	.84	.85	.77
6 jours	.76	.83	.85	.77
7 jours	.75	.83	.84	.76

Note: La prévision est émise un à sept jours avant les valeurs observées aux stations des villes concernées.

Les tendances observées dans les résultats de la vérification des précipitations sont les mêmes que pour les températures, à savoir une diminution logique de la précision des prévisions lorsqu'on augmente le préavis, et de meilleurs résultats en été que pour les autres saisons. Encore une fois, un examen des résultats sur plusieurs années (non montrés ici) indique une amélioration graduelle de la qualité des prévisions, liée aux améliorations technologiques et scientifiques énoncées plus haut.

En ce qui a trait aux avertissements de pluie, seules les quantités de précipitations (prévues ou observées) excédant des seuils prédéterminés font l'objet d'une vérification non automatisée et effectuée par un météorologiste. Les procédures relativement aux avertissements de pluie ne sont pas couvertes ici puisque, comme mentionné plus haut, il n'est pas nécessaire d'avoir des quantités importantes de pluie pour déclencher ou mettre fin à un épisode de chaleur.

Pour le moment, le SMC n'émet pas d'avertissements de canicule et par conséquent n'a pas élaboré un système de vérification pour de tels événements. Cependant, tel que suggéré par d'autres services météorologiques à travers le monde et les autorités sanitaires qui utilisent des informations météorologiques pour des programmes d'alerte efficaces afin de protéger la santé publique, le développement de critères spécifiques qui aideront à évaluer la « chaleur excessive due aux conditions climatiques » (cf. CDC, 2012) est essentiel, de même que l'instauration d'un processus de vérification adapté pour ce type d'avertissements.

4. Inventaire des indicateurs climatiques et biométéorologiques

L'inventaire des indicateurs climatiques et biométéorologiques présenté ici est le résultat d'une revue et de jugement d'experts. Elle repose sur des expériences variées et de précieuses orientations provenant d'expertises diverses, et ces indicateurs sont d'usage régulier pour les prévisions météorologiques (p. ex., provenant de recommandations de l'OMM et/ou de services météorologiques nationaux), d'études sur le changement climatique et ses impacts (santé) (p. ex., des travaux du GIEC et de CLIVAR), et des agences de santé (p. ex., provenant de l'INSPQ, de Santé Canada, de l'InVS, etc.) au Canada et ailleurs dans le monde.

4.1 CONTEXTE DU DÉVELOPPEMENT DES INDICATEURS LIÉS À LA CHALEUR

Le facteur thermique de l'air ambiant représente un important problème de santé et a été associé dans de nombreuses études à une surmortalité importante (p. ex., Chebana *et al.*, 2013), comme ce fut le cas lors des vagues de chaleur en Europe, aux États-Unis ou en Australie (p. ex., Semenza *et al.*, 1996; Fouillet *et al.*, 2006; Tong *et al.*, 2010, respectivement). De nombreuses études ont utilisé une variété de mesures ou d'indicateurs liés à la chaleur via par exemple l'utilisation des Tmax et Tmin, la température apparente et/ou via l'usage d'autres indices biométéorologiques et humains de confort (ou d'inconfort) afin d'évaluer la vulnérabilité des populations au stress thermique (p. ex., Hoeppe, 1999; Spagnolo et de Dear, 2003; Nicholls *et al.*, 2008; Barnett *et al.*, 2010; Vaneckova *et al.*, 2011; Oleson *et al.*, 2015).

Parmi les définitions proposées, nous distinguerons : a) Les indices climatiques utilisés quant à l'évaluation des canicules (climat historique et futur), que ce soit à partir des données observées ou simulées, sans égard nécessairement à l'utilisation de ceux-ci pour des applications spécifiques dans le domaine sanitaire (p. ex., reposant essentiellement sur des définitions génériques proposées par des climatologues et utilisées dans des études climatiques, cf. IPCC, 2012 et 2013), et b) Les indices biométéorologiques combinant le plus souvent plusieurs variables (météorologiques et sanitaires) définies spécifiquement pour des applications sur la morbidité et la mortalité humaines.

4.1.a. Indices climatiques de canicule

La diversité des indices climatiques de canicule au sein de la communauté scientifique démontre l'absence de consensus terminologique (Smith *et al.*, 2013), alors que la plupart des définitions «génériques» ont été proposées pour des appli-

cations générales à l'échelle mondiale ou continentale. Parmi les définitions communément proposées pour les canicules, on retrouve le plus souvent l'utilisation de critères incluant l'occurrence individuelle (ou isolée) de valeurs quotidiennes de températures (le plus souvent Tmax) dépassant des seuils absolus ou relatifs, et selon des durées variables. Nommément, ces définitions combinent :

- Des seuils absolus de Tmax de plus de 3 à 5 °C par rapport à la moyenne climatique saisonnière de référence, sur une durée d'au moins trois à six jours consécutifs (Frich *et al.*, 2002; cf. projets internationaux ou des logiciels sont proposés pour le calcul de ces indices : CLIMDEX, STARDEX et ETCCDI).
- Des seuils relatifs de Tmax basés sur des valeurs \geq au 90e centile (ou autre centile de référence, Zacharias *et al.*, 2014) de la valeur climatologique de référence (notée Tmax90p), sur une durée d'au moins trois à six jours (Gachon *et al.*, 2005; Smith *et al.*, 2013).

Une étude récente réalisée en Allemagne (Zacharias *et al.*, 2014) a permis d'analyser l'impact des canicules sur la cardiopathie ischémique humaine vis-à-vis de la mortalité et la morbidité observées au cours de la période 2001 – 2010. Les canicules y sont définies comme des périodes d'au moins trois jours consécutifs avec une température moyenne quotidienne au-dessus du 97,5e centile de la distribution de température de référence. Au Canada, une étude de Casati *et al.* (2013) a utilisé six indices pour définir une vague de chaleur avec des combinaisons de Tmin et/ou de Tmax (critère univarié ou conjoint de Tmin et Tmax) au-dessus de seuils de températures fixes (22 à 24 °C pour les Tmin, et 30 à 35 °C pour les Tmax). Ces seuils de températures ont été sélectionnés par Santé Canada comme étant des valeurs empiriques connues pour leurs effets néfastes sur la santé humaine dans les communautés canadiennes (Casati *et al.*,

2013). Deux autres critères ont également été utilisés à partir des valeurs de Tmin ou de Tmax (occurrence non conjointe) au-dessus du 95e centile de référence à l'échelle annuelle.

L'Annexe D (Figure D.1.) présente la climatologie sur la période 1981-2010 des canicules pour le Canada (au sud de 60°N) utilisant les six définitions suggérées ci-dessus (Tmax $\geq 3, 5$ °C ou 90e centile du Tmax de référence avec des durées de trois ou six jours consécutifs ou plus). Comme le montre cette figure, les occurrences de six jours et plus (que ce soit avec des seuils absolus ou relatifs) sont climatologiquement très rares au Canada, avec le plus souvent moins d'une occurrence en moyenne par année sur la très grande majorité des régions. De plus, même avec des durées plus courtes de trois jours et plus, les occurrences de séquences de Tmax dépassant des seuils absolus (de 3 ou 5 °C) ou relatifs (Tmax90p) révèlent un portrait très variable d'une région à l'autre. Par exemple, les régions maritimes ou à proximité de grands plans d'eau (par ex., Grands Lacs, rivages de la baie d'Hudson, de la mer du Labrador et de l'océan Pacifique) montrent en général des occurrences plus faibles par rapport à d'autres secteurs lorsque les seuils absolus de Tmax sont utilisés, mais parfois plus élevées lorsque les seuils relatifs sont utilisés. Ceci suggère que des facteurs physiographiques locaux influencent largement l'occurrence, la durée et la sévérité des canicules, c'est-à-dire qu'ils modifient de façon non négligeable la distribution statistique de la température locale. C'est pourquoi, dans le contexte canadien, des définitions plus «flexibles» selon le territoire sont à envisager pour les canicules, sachant que l'on peut difficilement utiliser, sans les adapter aux conditions climatiques régionales du Canada, les critères ou les définitions proposées ailleurs dans le monde. Les extrêmes chauds des Tmax/Tmin sont en effet très différents d'une région à l'autre du Canada, la variabilité intra-mensuelle (au jour le jour) étant très élevée sur le territoire, et systématiquement plus élevée dans l'Est du Canada (affectant ainsi la persistance des épisodes de canicule), au moins pour les Tmin de juin à août et pour les Tmax en juin/juillet (cf. Annexe C, Figure C.2).

4.1.b. Indices biométéorologiques

Parmi les divers indices biométéorologiques qui ont été développés au niveau international et national, la plupart ont été utilisés pour évaluer les risques pour la santé liés à la chaleur (Vaneckova *et al.*, 2011). Les indices composites ou indicateurs biométéorologiques ont, entre autres, permis d'évaluer le confort ou l'inconfort humain associé aux canicules, plus précisément que ne le fait l'utilisation uniquement des températures. Les indicateurs biométéorologiques les plus connus incluent :

→ L'indice de chaleur (*heat index*, utilisé par ex. par le National Weather Service (NWS) aux États-Unis; Rothfus,

1990) : Cet indice combine, à partir d'une analyse par régression multiple, des données de température et d'humidité relative de l'air (Oleson *et al.*, 2015);

→ La température apparente (Steadman, 1994) : Cet indice combine les données de température de l'air, la pression partielle de vapeur d'eau de l'air, et la vitesse du vent à 10 m (Flatau *et al.*, 1992; Oleson *et al.*, 2010; D'Ippoliti *et al.*, 2010);

→ La température du thermomètre à globe humide simplifiée (Simplified Wet Bulb Globe Temperature; Willett et Sherwood, 2012) : Cet indice combine les données de température de l'air et de la pression de vapeur d'eau de l'air (plus une constante définie empiriquement);

→ L'indice humidex (Masterson et Richardson, 1979) : Cet indice combine également la température de l'air et la pression de vapeur d'eau de l'air (ou l'humidité spécifique). Le détail du calcul de cet indice, régulièrement utilisé au Canada, est fourni à l'Annexe A;

→ L'indice d'inconfort (Epstein et Moran, 2006) : Cet indice combine également la température de l'air et celle du point de rosée (Stull, 2011);

→ L'Indice Climatique Thermique Universel (Universal Thermal Climate Index, UTCI; Pappenberger *et al.*, 2015) : Cet indice a été défini afin d'intégrer non seulement des facteurs thermiques (température de l'air) mais également des informations sanitaires concernant l'équilibre thermique du corps humain, la physiologie du corps humain et les vêtements portés par les humains. Cet indice a été développé en utilisant un des modèles les plus validés et avancés dans ce domaine (Psikuta *et al.*, 2012) quant au transfert de chaleur et de thermorégulation humaine (Fiala *et al.*, 2001; Fiala *et al.*, 2012). Le développement de cet indice a été réalisé par une équipe multidisciplinaire d'experts dans le cadre d'une commission de la société internationale de biométéorologie (ISB) et du programme européen COST Action 730 (Cooperation in Science and Technology; Jendritzky *et al.*, 2009), sous l'égide de l'OMM – Commission de climatologie (CCI). Il peut être utilisé pour des applications clés en biométéorologie humaine, telles que les prévisions quotidiennes et les avertissements, la gestion urbaine et l'aménagement du territoire, l'épidémiologie environnementale et la recherche sur les impacts climatiques. De plus, cet indice s'applique à tous les types de climats (Pappenberger *et al.*, 2015).

Les cinq premiers indices biométéorologiques présentés ci-dessus ont fait l'objet d'une évaluation aux États-Unis et au Canada (sud du pays) afin de quantifier dans le contexte climatique actuel (1986-2005) et futur (2046-2065), des mani-

festations possibles de stress thermique en zones urbaines et rurales durant l'été, et d'examiner en particulier les effets de la densité urbaine sur le stress thermique (Oleson *et al.*, 2015). L'utilité de l'indice UTCI a été démontrée dans le cadre de la prévision probabiliste de la vague de chaleur de 2010 en Russie (Pappenberger *et al.*, 2015). Il a été établi que les prévisions probabilistes de l'indice UTCI sont supérieures aux prévisions déterministes (c'est-à-dire en utilisant un modèle météorologique unique) et que, malgré des variations globales, les prévisions de l'UTCI sont pertinentes ou adéquates pour des préavis jusqu'à 10 jours à l'avance (Pappenberger *et al.*, 2015).

Par ailleurs, plusieurs études d'impacts sur la santé humaine ont également utilisé diverses définitions d'indices biométéorologiques de canicule multi-variables (ex. SACS, 2006, D'Ippoliti *et al.*, 2010; Martel *et al.*, 2010; Chebana *et al.*, 2013). Au Québec par exemple, ces deux dernières études ont permis de démontrer qu'une définition des seuils d'alerte, basés sur une moyenne pondérée de trois jours consécutifs des Tmax et Tmin prévues, permet d'améliorer le système de vigilance des décès liés à la chaleur, dans différentes zones urbaines du Québec. En Europe, l'étude de D'Ippoliti *et al.* (2010) avait pour objectif également de produire une définition standard pour les canicules afin d'estimer l'impact sur la mortalité par genre, âge et causes de décès, en utilisant une combinaison de températures apparentes (2e indice listé ci-dessus) à la fois pour les Tmax et les Tmin. Cette étude a clairement démontré à quel point les effets des canicules sont très hétérogènes géographiquement, entre les neuf villes européennes étudiées, mais également que la mortalité augmente de plus de trois fois (par rapport au taux normal) durant les épisodes de longue durée et de forte intensité de chaleur. De plus, cette étude a montré que les effets les plus importants sont observés pour les personnes avec des difficultés respiratoires, surtout pour les femmes âgées de 75 à 84 ans.

En Australie, différents indices biométéorologiques composites ont été examinés pour évaluer la sensibilité des liens avec la mortalité (Vaneckova *et al.*, 2011), tels que la température apparente, l'indice de stress thermique, l'indice d'inconfort de Thom («Thom discomfort index»; Thom, 1959), l'humidex et la température du point de rosée. Les journées chaudes ont été définies comme des jours où les valeurs observées ont atteint ou dépassé le 95e centile pour chaque indicateur de stress thermique (Vaneckova *et al.*, 2011). Cette étude a révélé que, peu importe l'indice biométéorologique utilisé ou les mesures et critères de températures employés, la mortalité était plus importante durant les journées chaudes, par rapport aux autres journées (valeurs contrôles). De plus, cette étude démontre que l'effet des polluants de l'air (particules fines $\geq 10 \mu\text{m}$ et ozone) semble discernable pour certains indicateurs de température, et que l'usage de la

moyenne de température quotidienne performe de façon similaire aux indices composites (Vaneckova *et al.*, 2011).

En France, une étude récente sur la définition des seuils de températures utilisés pour le système de surveillance sanitaire lors de canicules (Pascal *et al.*, 2013) a évalué différents seuils potentiels comme les centiles associés à une surmortalité significative (centiles correspondant au point d'inflexion dans la réponse aux excès de mortalité), en utilisant les Tmax et les Tmin moyennées sur trois jours consécutifs. Dans les six villes françaises étudiées, il y avait une bonne corrélation entre les seuils actuels ainsi que les seuils dérivés des modèles, avec 0 °C à 3 °C de différence pour les Tmax moyennes. Cette étude a également montré que l'usage de différentes valeurs seuils a permis de bien anticiper les principales périodes d'excès de mortalité durant les étés de 1973 à 2003 (Pascal *et al.*, 2013).

Aux États-Unis, une étude récente sur les canicules (période 1987-2000), à partir de 108 communautés, a démontré que la plupart des excès de mortalité sont simplement liés à des effets indépendants de jours individuels de températures élevées (Gasparrini et Armstrong, 2011). Un effet supplémentaire se superpose lors de canicules qui durent plus de quatre jours.

4.2 CANICULE DE 2010 EN ONTARIO ET AU QUÉBEC

Dans le sud du Québec et en Ontario, le mois de juillet 2010 a été marqué par une vague de chaleur sans précédent, rarement observée au cours des dernières décennies (Bustinza *et al.*, 2013), c'est pourquoi cet événement a été choisi ici afin d'examiner ses principales caractéristiques. Nous examinerons par la suite si ce type d'événement pourrait augmenter en termes d'occurrence à travers le Canada dans le contexte du réchauffement climatique, à l'aide d'un ensemble de simulations de modèles climatiques régionaux disponibles au cours du 21^e siècle.

La canicule qui a sévi dans le Sud du Québec et de l'Ontario du 5 au 10 juillet 2010 a eu des effets documentés sur la santé humaine, avec une augmentation de 33 % de la mortalité et une hausse importante des admissions dans huit centres de santé du Québec (Bustinza *et al.*, 2013). Les Tmax dans le sud du Québec et de l'Ontario ont dépassé les 33 °C pendant plusieurs journées, avec des valeurs d'indice humidex de plus de 35 (*Figure 1*), voire jusqu'à des maximum de 42 à 45 dans certains secteurs de la vallée du Saint-Laurent et de la Montérégie lors des journées les plus chaudes (p. ex., lors de la journée du 8 juillet, *Figure 2*). De plus, les Tmin se sont maintenues au-dessus de 20 °C, notamment du 5 au 8 juillet 2010 pour Toronto et jusqu'au 10 juillet pour Montréal (*Figure 1*). Cette canicule fut donc exceptionnelle en termes de durée et d'intensité. Comme en

témoigne la *Figure 2*, cet événement a affecté les principales vallées densément peuplées de l'Ontario et du Québec, où sont localisées les principales agglomérations et infrastructures des deux provinces. Les vallées du Saint-Laurent et de Champlain/Rivière Richelieu avec leur orientation essentiellement nord-sud (i.e. permettant à l'air chaud et aux polluants provenant du sud de s'y déplacer) et leurs sources locales de polluants atmosphériques, correspondent aux régions avec les plus hauts taux de fréquence de smog et de forte concentration d'ozone au Canada (cf. <http://www.ec.gc.ca/Air/>). Ces zones ont été les plus touchées parmi les régions de santé du Québec (RSS) analysées et ont connu le plus grand nombre de décès au cours de la canicule de 2010 (Bustinza *et al.*, 2013), avec les plus hautes valeurs de Tmax ($\geq 34^{\circ}\text{C}$) et de Tmin ($\geq 24^{\circ}\text{C}$), ceci incluant Montréal, l'Outaouais et la Montérégie. Dans ces régions fortement urbanisées, les pics de Tmin ont été très rapidement atteints, à savoir 24 heures après le début de la vague de chaleur (le 4 juillet en Outaouais et le 5 juillet dans les régions de Montréal et de la Montérégie). Comme suggéré dans d'autres études aux États-Unis (Ramlow et Kuller, 1990; McGeehin et Mirabelli, 2001), la valeur maximale de Tmin et le temps pour atteindre celle-ci sont des facteurs importants à considérer dans l'estimation de l'intensité d'une canicule et dans l'évaluation de la gravité de ses effets (mortalité et morbidité) (Bustinza *et al.*, 2013).

En utilisant des critères conjoints de Tmin $\geq 20^{\circ}\text{C}$, Tmax $\geq 33^{\circ}\text{C}$ et indice humidex ≥ 40 durant trois jours consécutifs, soit des seuils similaires à ceux proposés au *Tableau 2* (section 3) ou dans l'étude sur la mortalité/morbidité de Chebana *et al.* (2013; cf. section 6 et *Annexe E*, RSS classe 3 correspondant à Montréal et la Montérégie), on peut effectivement démontrer que cette canicule fut inhabituelle par son étendue et son ampleur. Cette séquence de 3 jours et plus de températures et d'humidité (diurnes/nocturnes) combinées élevées est en effet rarement observée dans le climat actuel (non montré ici; la climatologie des vagues de chaleur utilisant une combinaison conjointe de Tmin et Tmax sur 3 jours et plus est présentée à la *Figure F.2*, *Annexe F*). Comme le suggère l'*Annexe F* (*Figure F.1*), la fréquence des vagues de chaleur (de mai à septembre) de ce type augmentera, surtout dans la deuxième moitié du 21^e siècle, dans le sud du Québec, de l'Ontario, du Manitoba et de la Saskatchewan, selon les projections régionales d'ensemble disponibles (à partir de simulations de différents modèles régionaux du climat). En utilisant les mêmes seuils conjoints de Tmax ($\geq 33^{\circ}\text{C}$), Tmin ($\geq 20^{\circ}\text{C}$) et de valeur d'humidex (≥ 40), on peut en effet s'attendre à un doublement du nombre d'occurrences de ces événements d'ici la fin du 21^e siècle (selon le scénario RCP8.5; *Figure F.1* *Annexe F*), de moins d'une occurrence dans le climat actuel, à une ou deux en moyenne par année dans le climat futur, dans ces régions du centre et de l'est du Canada. Si on utilise certains indicateurs pour mettre en évidence un signal plus modéré (en utilisant par exemple des

seuils combinés de Tmax $\geq 31^{\circ}\text{C}$ et de Tmin $\geq 16^{\circ}\text{C}$ identiques à ceux appliqués dans les zones nord des RSS, cf. *Annexe E*, *Tableau E.1*), une extension plus prononcée de ce type de vague de chaleur pourrait être anticipée dans toutes les régions du Canada dans les conditions climatiques futures.

En résumé, même si des définitions de canicule orientées vers des applications dans le domaine sanitaire ont été proposées, la grande majorité des études a confirmé l'importance d'utiliser des seuils en termes de Tmax et Tmin, voire également en termes de durée, qui tiennent compte du contexte météorologique et climatologique local (Laaïdi *et al.*, 2004; Chebana *et al.*, 2013), en plus des facteurs de vulnérabilité socio-économiques des populations concernées et de leur degré d'exposition (IPCC, 2012; Bouwer, 2013). Plusieurs études ont effectivement montré que ces seuils, utilisés pour les systèmes d'alerte, peuvent varier considérablement d'une ville à l'autre. Au Canada, compte tenu de la très grande diversité de conditions climatiques (et météorologiques) à travers le pays, il est d'autant plus important d'utiliser des seuils flexibles sur le territoire. Au Québec, un tel système de veille et d'alerte avec des seuils adaptés au climat régional de chaque sous-région de la province est devenu opérationnel en juin 2010 (Toutant *et al.*, 2011), en remplacement de seuils identiques d'un secteur à l'autre de la province. En Ontario et en Alberta, des seuils différents, adaptés aux régions climatiques, ont été identifiés par le SMC, en collaboration avec les DSP locales. Le SMC est en voie d'harmoniser ses avertissements de chaleur avec les alertes de chaleur extrême des autorités publiques afin de communiquer le risque au public d'une manière cohérente.

Figure 1. Tmax, Tmin et indice humidex (maximum et moyen quotidien) observés pour les stations de Montréal (McTavish) et de Toronto (Pearson) du 1^{er} au 31 juillet 2010. Ces stations font partie du réseau de stations d'ECCC.

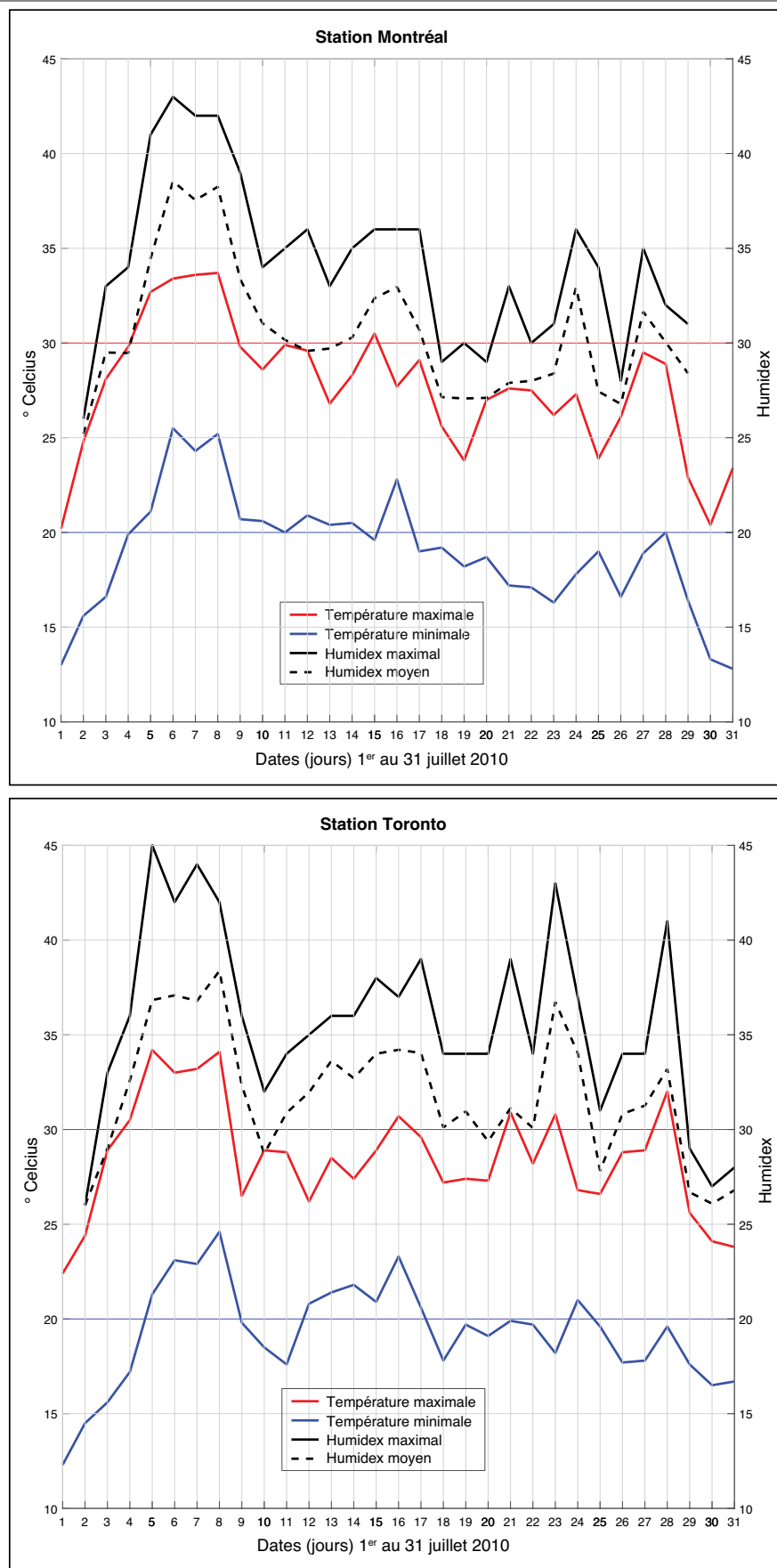
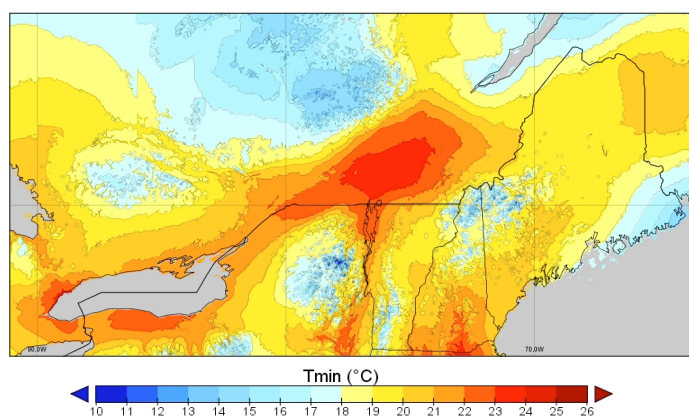
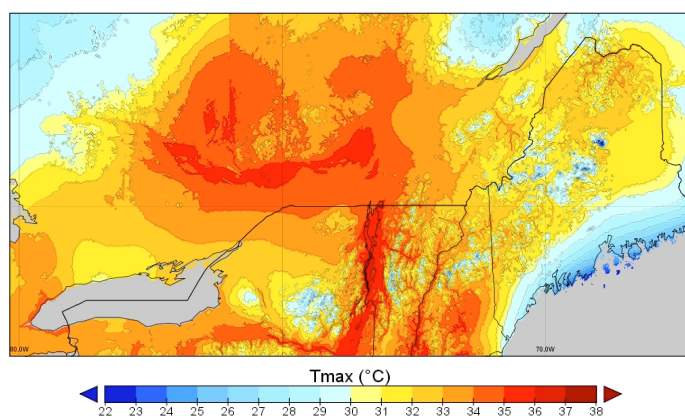


Figure 2. Valeurs du 8 juillet 2010 dans le Sud du Québec et de l'Ontario pour a) Les Tmin, b) Les Tmax et c) L'indice humidex. L'indice humidex a été calculé à partir des variables disponibles (p. ex., pression de vapeur d'eau et températures quotidiennes) issues de la base de données Daymet (Bristow et Campbell, 1984; Thornton *et al.*, 1997; Thornton et Running, 1999; Thornton *et al.*, 2014).

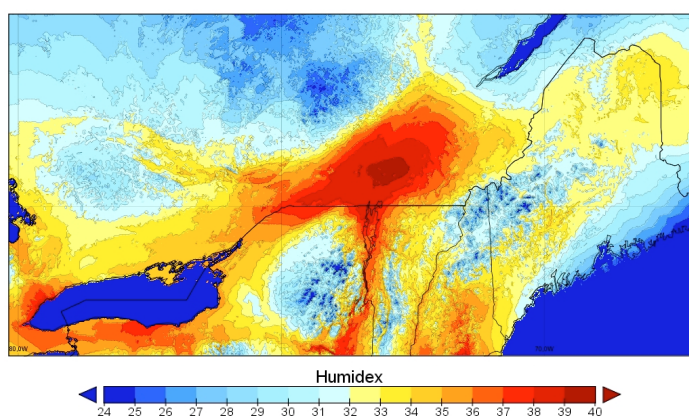
a) Température minimale du 8 juillet 2010



b) Température maximale du 8 juillet 2010



c) Humidex du 8 juillet 2010



Note: Toutes les valeurs sont dérivées de la base de données sous forme de grille de Daymet produite par le NTSG (Numerical Terradynamic Simulation Group; <http://www.ntsg.umd.edu/project/daymet>) à 1 km de résolution.

5. Prédiction de la température de l'air dans les zones urbaines et périurbaines

5.1 CONCEPT D'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN (ICU)

La température de l'air en milieu urbain peut différer substantiellement de la température en milieu rural. Cet effet d'ICU est causé par l'emménagement de la chaleur durant le jour par certains matériaux de surface (comme le béton, le bitume, etc.), puis la restitution de cette chaleur accumulée durant la nuit. En outre, le rapport de Bowen¹⁷, qui correspond au rapport entre le flux de chaleur sensible (conduction ou convection de chaleur depuis la surface vers l'atmosphère ou inversement) et le flux de chaleur latente (relié à l'évaporation de l'eau en surface), est de 0,2 environ dans les zones de production agricole irriguée, de 0,5 dans les champs d'herbes, et supérieur à 0,7 en régions urbaines¹⁸ (Chapitre 3, p.74-75, Stull, 2015). Ceci est directement relié au fait que les surfaces végétalisées sont plus réduites et les sols « artificiellement » plus imperméabilisés en milieu urbain qu'en campagne, limitant ainsi l'infiltration de l'eau et l'accumulation de l'eau dans le sol. Le résultat est de favoriser des températures de surface plus élevées en ville qu'en campagne (et des flux de chaleur sensible depuis la surface qui favorisent le réchauffement de l'air sus-jacent), en raison du plus faible taux d'évaporation dans les surfaces urbanisées que dans les zones naturelles. Dans ces dernières le processus d'évaporation peut refroidir la température de surface et limiter ainsi l'accroissement des températures de l'air sus-jacent durant le jour (Oke, 1982, et 1997).

Certaines grandes villes (plus d'un million d'habitants) affichent donc des températures annuelles moyennes de 1 °C à 2 °C plus élevées que le milieu rural environnant (Oke, 1997). Lors de nuits où le vent est calme et le ciel dégagé, la différence de température peut parfois atteindre jusqu'à 12 °C (Oke, 1987). À l'intérieur même des villes, certains quartiers ou secteurs peuvent également être plus chauds que d'autres, constituant des îlots de chaleur intra-urbains (ICIU). Durant la journée, la situation est plus complexe (Bryson et Ross, 1972) et l'écart thermique entre les zones rurale et urbaine peut s'avérer plus grand ou plus faible (que durant la

nuit) selon les conditions de surface et le contexte météorologique (Oke, 1997; Martin *et al.*, 2015).

5.2 FACTEURS LOCAUX D'EXACERBATION DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR DANS LES VILLES

Plusieurs facteurs contribuent au changement de température de l'air ambiant à l'échelle locale, certains d'origine naturelle ou « incontrôlable », et d'autres d'ordre anthropique ou « contrôlable » (Memon *et al.*, 2008).

La température à l'échelle locale est influencée essentiellement par trois facteurs naturels, donc incontrôlables :

1. L'advection (horizontale), reliée au transport d'une masse d'air d'un endroit à un autre, donc dépendant des vents et des caractéristiques de température et d'humidité de la masse d'air considérée;
2. La turbulence, influençant les sources et puits de chaleur et d'humidité depuis la surface vers l'atmosphère ou inversement;
3. La topographie, responsable des mouvements subsidants/ascendants de l'air à proximité des montagnes. Cet effet est appelé « effet foehn¹⁹ » (compression par subsidence, ou expansion par ascendance, de la masse d'air, provoquant un réchauffement ou un refroidissement de celle-ci, respectivement).

Les facteurs incontrôlables incluent par ailleurs les paramètres météorologiques comme la couverture nuageuse, la vitesse du vent, les conditions d'ensoleillement et les précipitations, ainsi que les conditions de surface naturelles (ces paramètres modifiant le bilan énergétique de surface et la température de l'air au-dessus de la surface).

Les facteurs contrôlables incluent l'occupation du sol et la modification de l'environnement naturel par l'activité humaine.

¹⁷ Le rapport de Bowen (B) est défini par : $B = FH/FE$ où FH est le flux de chaleur sensible et FE le flux de chaleur latente. Ce rapport permet de répartir la part relative des flux turbulents de chaleur et d'humidité et dépend largement de la disponibilité de l'humidité en surface (Oke, 1982; Stull, 2015).

¹⁸ Ce rapport est généralement plus élevé en ville qu'en campagne, avec des valeurs de 0,75 à Montréal et plus de 1 à Vancouver, mesurées à partir de valeurs observées dans ces deux villes (Oke et Fuggle, 1972; Yap et Oke, 1974; Oke, 1983).

¹⁹ La masse d'air située sur le versant ascendant (versant au vent) de la montagne subit un refroidissement important en s'élevant, ce qui augmente son humidité relative jusqu'à possiblement saturation. S'il y a condensation, il y aura production de nuages voire des précipitations du côté au vent de la montagne. En aval de la montagne (versant sous le vent), l'air redescend et se réchauffe par compression et s'éloigne de son point de saturation (généralement la pluie cesse et le ciel se dégage). Selon la quantité de vapeur d'eau perdue et la différence d'altitude de chaque côté de l'obstacle, la température en aval pourra être plus chaude qu'en amont.

Ils comprennent les sources de chaleur industrielles ou autres, les polluants atmosphériques, les conditions modifiées de surface telles que présentées précédemment (ICU et ICIU) et la structure urbaine (géométrie) de la ville. Par exemple, un «canyon urbain», soit une rue étroite et bordée d'édifices en hauteur, influence la circulation du vent et peut ainsi favoriser la stagnation de l'air entre les édifices, ou à l'inverse, accélérer son déplacement si les vents soufflent parallèlement à l'axe de la rue. Le canyon influence aussi la quantité de rayonnement solaire reçu le jour, ainsi que la portion de la radiation infrarouge réémise la nuit (Oke, 1982). En effet, les rues encaissées entre de grands immeubles reçoivent moins de radiation solaire, à cause de l'effet d'ombrage lié à leur présence, mais en contrepartie l'étroitesse du canyon urbain freine la dissipation de la chaleur vers le haut.

Au SMC, diverses méthodes ou stratégies sont employées afin de prévoir la température à l'échelle régionale (quelques milliers de km²), locale ou urbaine (quelques centaines de km²), ou même à plus fine résolution, soit intra-urbaine (quelques dizaines de km², ou moins). Cette section identifie et explique deux approches différentes, en ce qui a trait à la prévision de la température à l'échelle urbaine et intra-urbaine : l'approche géostatistique et l'approche de modélisation numérique à haute résolution.

5.3 APPROCHE GÉOSTATISTIQUE

L'approche géostatistique est utilisée pour déterminer d'abord la variabilité spatiale des températures dans une ville en mode rétrospectif (en utilisant les observations pour reconstruire spatialement des événements de chaleur), puis en mode prévisionnel (en utilisant un modèle géostatistique développé à partir d'observations pour prédire les températures dans les différentes zones de la ville). Cette approche est basée sur des campagnes de mesure de la température et a été testée à Montréal à partir de données recueillies au cours des étés 2013 et 2014.

5.4 CAMPAGNES DE MESURES DE LA TEMPÉRATURE

Historiquement, les prévisions de température pour une ville sont basées sur les températures observées aux aéroports avoisinants, c'est-à-dire situés le plus souvent en périphérie de la ville, et ont constitué longtemps la quasi-unique source fiable d'information météorologique. Ces aéroports, qui constituent les stations de référence, ne sont cependant que rarement représentatifs de la température réelle qui affecte le tissu urbain.

Par exemple, la température prévue pour la grande agglomération de Montréal est basée sur les observations de température à l'Aéroport International Pierre-Elliott-Trudeau, dont l'environnement physique est passablement différent de celui

du centre-ville de Montréal. Conséquemment, les seuils de température servant au déclenchement d'un «plan canicule» par les autorités sanitaires, ou à l'émission d'avertissements de chaleur par le SMC, peuvent être atteints dans certains quartiers sans toutefois l'être à la station de référence.

Le réseau actuel de stations d'observation n'étant généralement pas suffisamment dense au sein des zones urbaines, l'implantation d'un réseau temporaire de stations météorologiques couvrant plusieurs secteurs de la ville (durant la période propice aux canicules) revêt alors un intérêt considérable (Muller *et al.*, 2013).

Quelques études ayant pour objectif de quantifier l'impact des ICU sur la variabilité intra-urbaine de la température ont été réalisées (p. ex., Basara *et al.*, 2008 et 2010; Watkins *et al.*, 2002; Cheung, 2011; Bergeron, 2012). Ces campagnes de mesures permettent de générer des banques de données qui fournissent un aperçu de la variabilité spatio-temporelle de la température en fonction de différents types d'environnements urbains.

De plus, ces données d'observation peuvent être utilisées dans le développement de modèles géostatistiques de prévision des températures intra-urbaines ou dans l'évaluation de modèles atmosphériques numériques à très haute résolution dont il sera question plus loin. En raison de la présence de différents environnements physiques qui influencent la variabilité spatiale de la température, les sites d'observation doivent donc être choisis afin de représenter le plus possible les types d'environnement urbains, par exemple, le type d'occupation du territoire ou le taux de végétation estivale.

Dans un environnement urbain, il est pratiquement impossible pour la plupart des sites d'observation météorologique de se conformer aux normes de l'OMM (par exemple, la zone de dégagement autour des capteurs). Un guide préparé pour l'OMM par Oke (2006) offre des recommandations pour obtenir des observations météorologiques représentatives aux sites urbains. On opte alors pour des critères réalistes de dégagement des bâtiments et du sol et l'on s'assure que l'environnement immédiat des capteurs (ou sondes) soit relativement homogène.

En somme, une campagne de mesures *in situ* permet d'observer l'évolution de la température dans différents quartiers ou environnements urbains. Il existe des techniques qui permettent d'étendre ou de raffiner cette information à l'ensemble du territoire d'intérêt, via par exemple des approches géostatistiques ou de modélisation urbaine décrites ci-dessous.

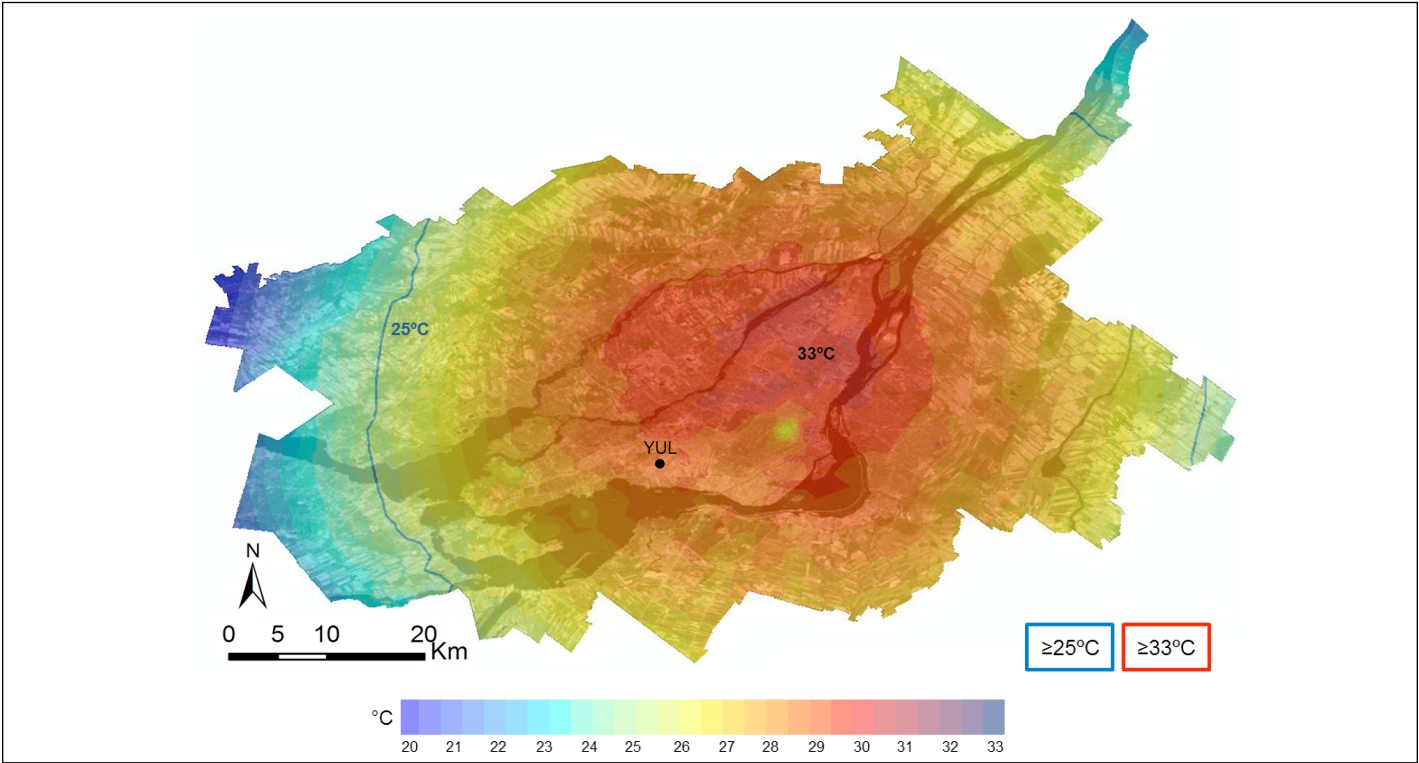
5.4.a. Étude de cas : Campagnes de mesures à Montréal (2013 & 2014)

Le SMC a conduit deux campagnes de mesures de la température (de l'air) en période estivale dans divers quartiers de Montréal (en 2013 et en 2014). Le but de ces campagnes était de quantifier les différences entre la température observée dans divers environnements urbains et la température mesurée à la station de référence (Aéroport international Pierre-Elliott-Trudeau). Près de 30 sites d'observation ont été sélectionnés afin de représenter fidèlement les différents environnements physiques présents en ville.

Les mesures effectuées durant l'été 2013 à Montréal ont révélé entre autres que les températures observées la nuit sont généralement plus élevées au centre-ville, et qu'en milieu résidentiel la température est influencée par le taux de végétation de l'endroit. Les différences entre les Tmax enregistrées dans la majorité des sites au sein de la ville (ICIU) et celles observées à l'Aéroport International Pierre-Elliott-Trudeau peuvent atteindre jusqu'à 2 °C en période de canicule, mais les écarts les plus importants sont généralement observés la nuit (jusqu'à 4 °C).

L'information issue des observations a été combinée avec d'autres variables géophysiques ou reliées au plan d'occupation du sol (topographie, taux de végétation, structure urbaine, etc.), afin de spatialiser, via une méthode d'interpolation (méthode de co-krigeage, soit le krigeage, en considérant des covariables de surface), la température à Montréal. La Figure 3 montre un exemple de cette approche pour reconstruire la distribution spatiale de la température de l'air dans la région du Grand Montréal au cours d'une canicule (en juillet 2013), en mode rétrospectif.

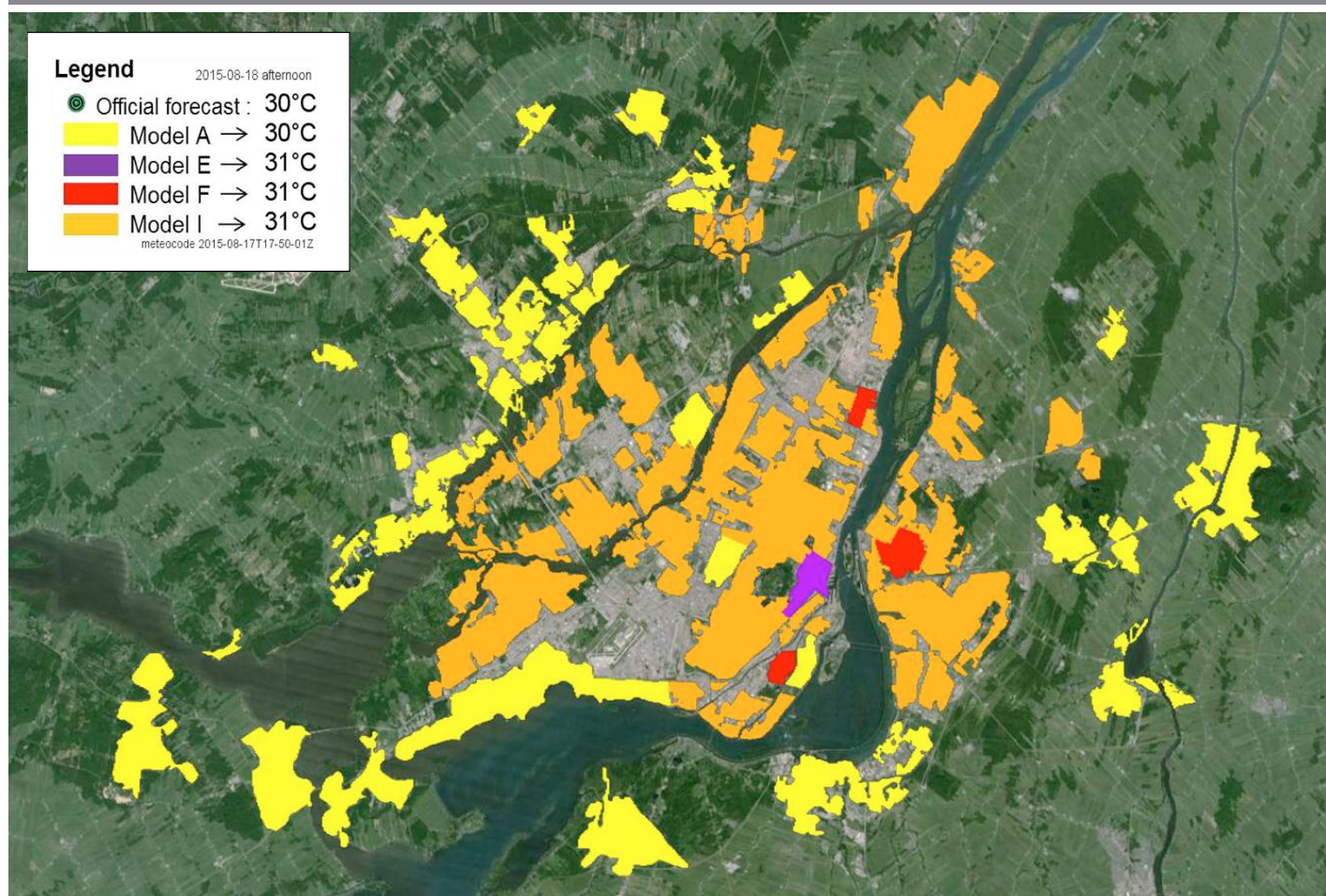
Figure 3. Distribution spatiale de la température de l'air (en °C) dans le Grand Montréal le 16 juillet 2013, 21 h (heure locale) (approche géostatistique). YUL correspond à la position de la station de l'aéroport Pierre Elliott Trudeau.



Les campagnes de mesures menées à Montréal ont aussi permis le développement d'un modèle en mode prévisionnel (modèle de régression multivarié), incorporant des informations météorologiques reliées aux conditions de surface, afin de représenter le comportement thermique sur l'ensemble de l'agglomération lors d'un épisode de canicule. Ceci a donc permis d'analyser plus en profondeur les liens entre les conditions de surface et les conditions météorologiques. Cette analyse a conduit au développement d'un modèle pour l'estimation des différences de température dans divers quartiers par rapport à la station de référence.

Ce modèle a également été utilisé en mode prévisionnel afin d'anticiper la température sur certains secteurs de l'agglomération de Montréal. Le 16 juillet 2013, la Tmax prévue à l'Aéroport était de 31 °C. Selon l'approche géostatistique, les secteurs présentant à la fois un taux de végétation similaire et une structure urbaine similaire ont été regroupés en diverses zones (cf. *Figure 4*, Modèles A, E, F et I) avec différentes Tmax prévues. À la *Figure 4*, on observe les mêmes secteurs chauds sur les îles de Montréal et Laval, ainsi que sur la rive sud (Longueuil / Brossard), que ceux indiqués à la *Figure 3*. Ce modèle, bien que prometteur, devra toutefois être soumis à des validations supplémentaires. Cette approche géostatistique, après validation par des observations *in situ*, fournira des informations précieuses en mode prévisionnel.

Figure 4. Distribution spatiale de la température de l'air (en °C) le 16 juillet 2013 pour certains secteurs du Grand Montréal (mode prévisionnel).



5.4.b. Étude de cas : Évolution du dôme de chaleur le 16 juillet 2013 dans le Grand Toronto

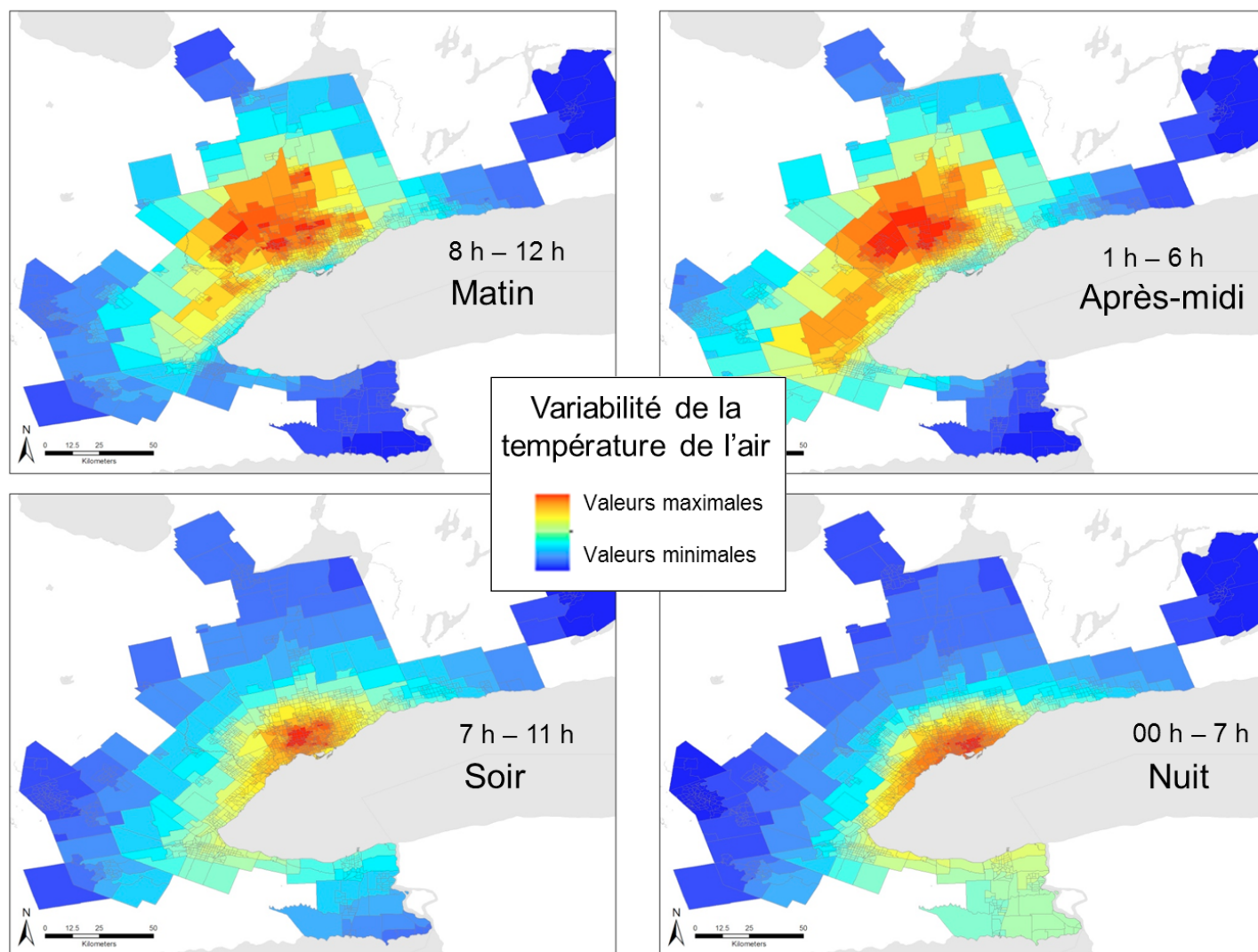
Le même exercice a été mené dans le Grand Toronto en utilisant les réseaux de stations officielles déjà installées, mais également certains réseaux de stations privées (ex. : *Wunderground*), à défaut de campagnes de mesures ciblées. Pour Toronto, seule la reconstruction spatiale d'épisodes de chaleur a été jusqu'à présent réalisée. Le manque de données fiables issues de campagnes ciblées limite pour le moment le développement d'un modèle géostatistique en mode prévisionnel pour cette ville.

Cette étude a permis d'évaluer comment la chaleur est distribuée dans l'agglomération de Toronto lors d'un épisode caniculaire, alors que la présence d'un anticyclone favorise l'établissement d'une brise en provenance du lac Ontario. La brise de lac se développe par temps ensoleillé, et produit un

vent qui souffle depuis le lac vers la rive, en raison de l'écart de température qui augmente au cours de la journée entre la surface de l'eau (plus froide) et la surface terrestre (plus chaude).

La Figure 5 montre le dôme de chaleur au cœur du centre-ville de Toronto, aux abords du lac Ontario. Graduellement, au cours de la journée (8 h à 18 h, heure locale), le dôme de chaleur est repoussé vers le nord, à la faveur de la brise de lac qui se développe et qui rafraîchit les abords immédiats du lac. En fin de journée, la brise de lac s'estompe et disparaît, permettant à la chaleur de se réinstaller au centre-ville le soir (19 h à 23 h, heure locale) et la nuit (0 h à 7 h, heure locale).

Figure 5. Distribution spatiale de la température horaire à Toronto du 16 juillet 2013 à 08 h au 17 juillet 2013 à 7 h (heure locale).



5.5 MODÉLISATION NUMÉRIQUE URBAINE À HAUTE RÉOLUTION

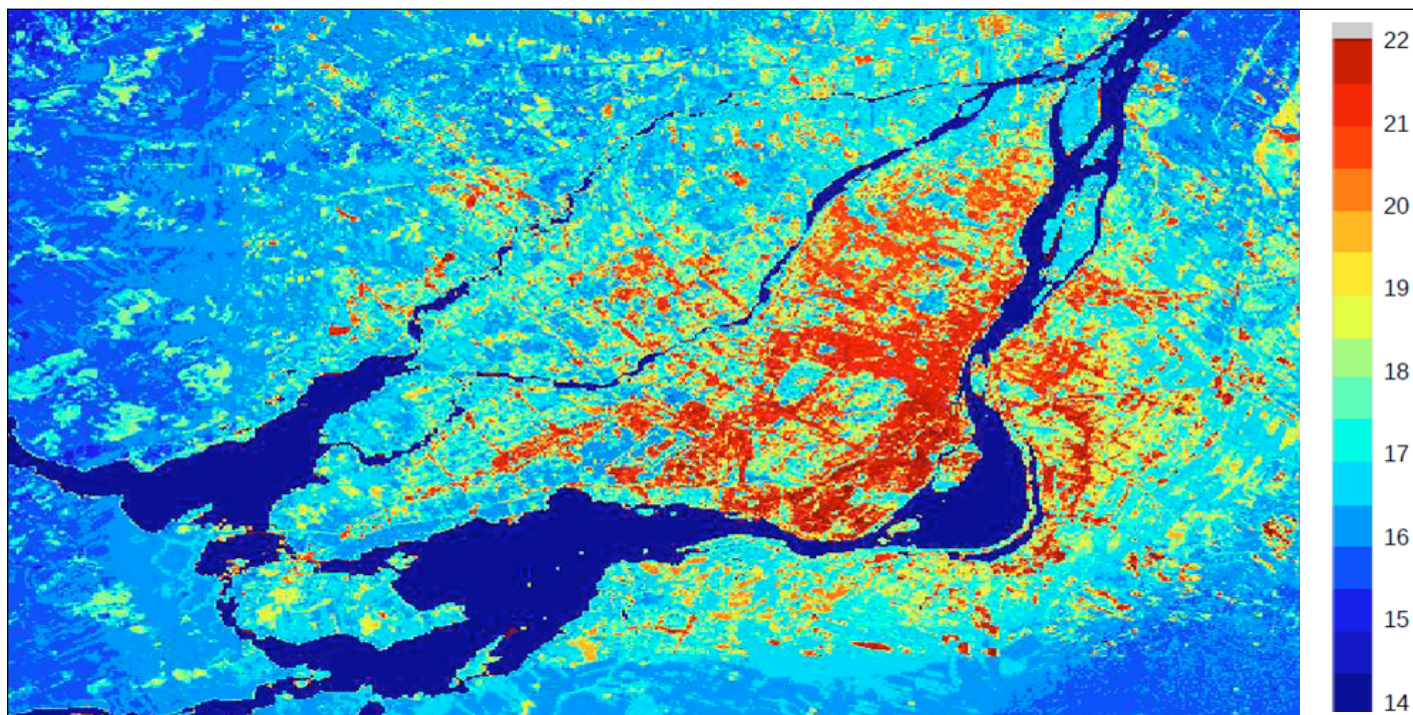
Tous les grands centres météorologiques à travers le monde basent leurs prévisions sur des modèles numériques. ECCC a développé ses propres modèles, pour différentes échelles de temps et à différentes résolutions (échelles spatiales). Les modèles actuellement utilisés au SMC sont le Système régional de prévision déterministe (SRPD), pour les prévisions jusqu'à deux jours, avec une résolution de 10 km, et le Système global de prévision déterministe (SGPD), jusqu'à dix jours, à une résolution de 25 km. Un modèle à résolution plus fine (Système à haute résolution de prévision déterministe, SHRPD), à une résolution de 2,5 km, est maintenant disponible et sera bientôt mis en œuvre partout au Canada. Le SRPD est mis à jour quatre fois par jour, tandis que le SGPD et le SHRPD sont actuellement mis à jour deux fois par jour. L'analyse et la prévision du temps à l'aide de modèles numériques nécessitent une quantité impressionnante de puissance informatique et de traitement de données. En outre, plus fine est la résolution, plus les modèles requièrent de puissance informatique.

Dans cette perspective, les modèles avec une résolution spatiale assez fine pour capturer les différents environnements au sein d'une ville exigent une énorme capacité informatique, et ne peuvent pas couvrir tout un pays, en particulier un pays aussi vaste que le Canada. Non seulement la capacité de traitement des ordinateurs devrait être gigantesque, mais le temps nécessaire pour analyser et produire des données serait trop long pour être d'une quelconque utilité pour les prévisions à court terme.

Néanmoins, ECCC poursuit le développement d'un système de modélisation numérique atmosphérique urbain (et intra-urbain) à haute résolution (1 km et 250 m) afin d'améliorer les prévisions météorologiques pour les grandes villes canadiennes (Leroyer *et al.*, 2014). En parallèle, ECCC développe aussi un autre système à très haute résolution (120 m). Ce dernier simule les conditions près de la surface (technique de «*downscaling*²⁰», ou réduction d'échelle), sur la base des informations météorologiques issues de modèles avec une résolution inférieure (Figure 6, source : Leroyer *et al.*, 2011). La température de l'air sur une ville peut donc être simulée en utilisant ce système de modélisation, identifiant ainsi les secteurs les plus chauds.

²⁰ La réduction d'échelle (*downscaling*) (dynamique) est une technique qui permet d'obtenir des modèles météorologiques régionaux ou locaux de résolution plus élevée que les modèles globaux à partir desquels ils sont le plus souvent produits.

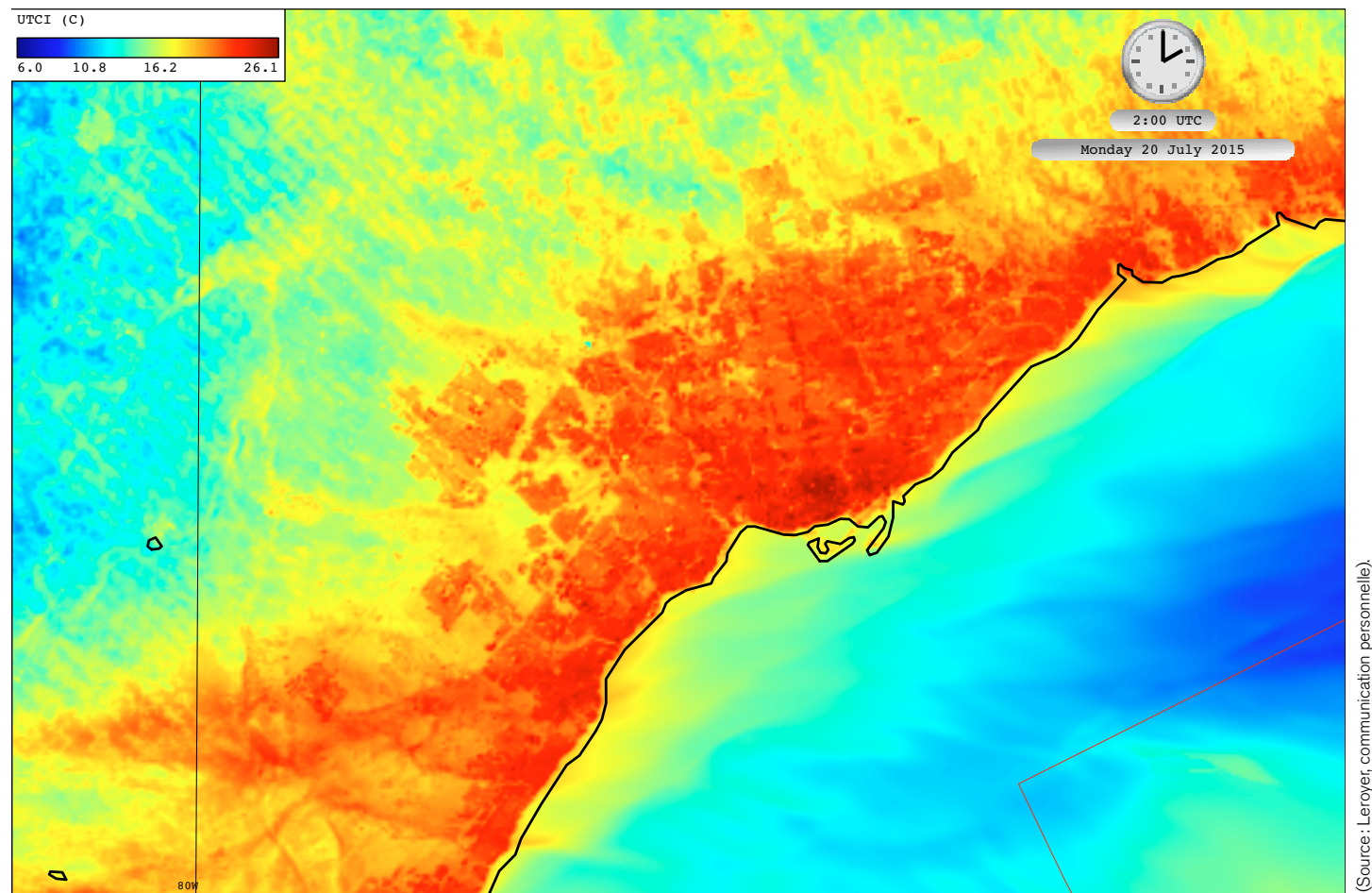
Figure 6. Simulation des températures de l'air (à 2 mètres, en °C) à 120 m de résolution au-dessus du Grand Montréal le 6 juillet 2008 à 11 h (heure locale).



Grâce à ce type de modélisation urbaine, il devient alors possible de calculer, entre autres, différents indices de confort thermique, par exemple l'indice biométréologique UTCI présenté à la section 4, et ce à haute résolution (250 m), comme le montre la *Figure 7* pour la ville de Toronto (source : Leroyer et Bélair, 2014).

En résumé, dans un contexte d'identification de seuils d'alertes aux canicules pour les centres urbains, de tels modèles (géostatistique et outils numériques) peuvent être d'une grande utilité puisqu'ils fournissent une information détaillée dans l'espace et dans le temps.

Figure 7. Simulation de l'UTCI à 250 m de résolution pour le Grand Toronto.



Bien que les méthodes présentées ici (approche géostatistique et modélisation à haute résolution) permettent toutes deux de spatialiser ou de régionaliser la température à l'échelle urbaine et intra-urbaine, elles ont chacune leurs limites/avantages, tel que décrit au *Tableau 5*.

TABLEAU 5. Comparaison entre l'approche géostatistique et la modélisation à haute résolution.	
MODÉLISATION NUMÉRIQUE À HAUTE RÉOLUTION	APPROCHE GÉOSTATISTIQUE
Destinée aux grandes agglomérations	Peut être réalisée partout
Résultats plausibles mais non encore validés par des observations	Repose sur le principe que le comportement thermique de la canopée urbaine est pris en compte dans les observations
Sorties de modèle dynamiques (varient en fonction des intrants), donc peuvent refléter l'évolution d'une ville, en temps quasi-réel, ou en mode projection via l'utilisation de scénarios d'urbanisation	Résultats validés par des mesures et appliqués en mode prévisionnel Résultats statiques : Les différences spatiales entre les valeurs générées et la station de référence sont présumées constantes
Requiert une infrastructure et des ressources informatiques importantes	Ne requiert qu'un système d'information géographique (SIG)
Résolutions spatiales de 120 m, 250 m, 1 km	Résolution spatiale variable à l'échelle du quartier

6. Considérations sur l'identification des seuils

Un système d'alerte canicule doit être capable d'anticiper l'occurrence des vagues de chaleur susceptibles d'avoir un impact significatif sur la santé, permettant ainsi aux intervenants de la santé publique la mise en place opportune de mesures de prévention. La plupart de ces systèmes d'alerte sont basés sur la surveillance d'un paramètre météorologique (ou une combinaison de plusieurs paramètres tel que suggéré à la section 4) afin d'évaluer le risque d'atteindre certains seuils d'alerte pendant une période donnée. L'identification des seuils est ainsi une phase essentielle dans le développement d'un système d'alerte.

Plusieurs étapes sont nécessaires pour l'identification de ces seuils, soit : 1) L'identification de paramètres météorologiques mesurant l'exposition à la chaleur, 2) L'identification d'indicateurs sanitaires pour mesurer l'impact de la chaleur sur la santé, 3) L'identification de groupes vulnérables, et 4) L'analyse de l'association entre les indicateurs sanitaires et les paramètres météorologiques.

6.1 IDENTIFICATION DE PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES

Les paramètres météorologiques (mesures de l'exposition à la chaleur par les individus et facteurs de stress thermique via des seuils de Tmax et Tmin, et taux humidité de l'air) ont été identifiés dans les sections précédentes (sections 3 et 4), auxquels peuvent s'ajouter des seuils de pollution. Pour identifier les paramètres météorologiques les plus adéquats, et déterminer l'exposition à la chaleur, les informations (observations et prévisions) doivent être disponibles sur une base quotidienne et les prévisions doivent être les plus précises possibles (cf. section 3, *Tableau 3*). Au Québec, le système de surveillance SUPREME (cf. *Annexe B*) utilise les paramètres météorologiques Tmax et Tmin dans la mesure où ils ne sont pas seulement disponibles sur une base quotidienne, mais également parce que leurs prévisions sont considérées très précises. Cependant, même si des seuils pour l'humidité ont été déterminés (Chebana *et al.*, 2013), le système SUPREME n'utilise pas ce paramètre dans le processus de prise de décision d'envoyer ou pas une alerte chaleur, car les prévisions d'humidex ne sont disponibles (et fiables) que jusqu'à 48 heures. Toutefois, les prévisions d'humidité sont envoyées conjointement avec les avertissements de chaleur car elles peuvent être utilisées par les intervenants pour moduler la réponse de santé publique.

6.2 IDENTIFICATION D'INDICATEURS SANITAIRES

Plusieurs indicateurs de santé sont considérés adéquats pour mesurer l'impact de la chaleur sur la santé. Les canicules exercent de plus un stress sur les déterminants sociaux et environnementaux de la santé, et comme on l'a mentionné

précédemment, ont un impact sur la mortalité, la morbidité et le bien-être des populations. Par exemple, en Australie, les conséquences des canicules représenteraient un fardeau économique annuel d'environ 6,2 milliards de dollars (US), en raison notamment de la perte de productivité (baisse de performance au travail, à l'école et absentéisme; Zander, 2015). Au Québec, au cours des six dernières années (2010 à 2015), 14 des 16 régions administratives couvertes par le système SUPREME ont été touchées par au moins une vague de chaleur extrême (telle que définie à la section 2). De plus, des augmentations quotidiennes significatives des taux de décès, ou encore des admissions aux urgences et des transports ambulanciers, ont été observées (Bustanza et Lebel, 2012; Bustanza *et al.*, 2014; Bustanza *et al.*, 2013; Lebel et Bustanza, 2013; Bustanza *et al.*, 2015).

Plusieurs indicateurs de santé ont été identifiés dans une revue de la littérature (Tairou *et al.*, 2010) et peuvent être utilisés pour définir les effets sanitaires des canicules, notamment pour s'assurer d'une préparation adéquate pour les décideurs en santé publique, réaliser le suivi des conditions sanitaires et de leurs déterminants environnementaux (p. ex., aléas hydrométéorologiques), et ultimement prévenir ou réduire les dommages sur la santé.

Diverses causes de morbidité liées à la chaleur ont été soulignées dans la littérature; toutefois, l'indicateur sanitaire le plus souvent utilisé demeure la **mortalité** toutes causes confondues (Anderson et Bell, 2009; Basu et Samet, 2002). Au Québec, lors de la vague de chaleur ayant affectée une partie importante de la province en juillet 2010 (cf. section 4), des augmentations significatives des taux bruts de mortalité toutes causes confondues (jusqu'à 36 %) ont été observées

dans trois des huit régions administratives affectées par la canicule (Bustanza *et al.*, 2013), dans des régions très urbanisées. Il est bien connu que la puissance statistique pour détecter un impact significatif dépend grandement du nombre d'événements observé. Ainsi, les régions moins peuplées avec un nombre limité d'événements sanitaires journaliers, ne montrent souvent pas d'impacts significatifs sur la mortalité (toutes causes confondues) en raison du manque de puissance statistique. Les effets sur la mortalité peuvent se présenter immédiatement après le début de la vague de chaleur, mais également apparaître jusqu'à trois jours après la fin de la canicule (mortalité quelle qu'en soit la cause), et jusqu'à quinze jours pour la mortalité par maladies respiratoires (Ledrans et Isnard, 2003; Gasparrini *et al.*, 2015). Le facteur temps est ainsi d'une grande importance pour la veille et la surveillance des effets sanitaires de la chaleur. En général, l'indicateur de mortalité toutes causes confondues semble être un indicateur suffisamment sensible et spécifique dans la mesure où les variations journalières des décès reflètent clairement les fluctuations des températures lors d'une vague de chaleur (Lebel et Bustanza, 2013). Cet indicateur est également disponible en temps réel ou quasi-réel et il mesure adéquatement l'impact de la chaleur sur la santé, ce qui est important à considérer à des fins de surveillance.

Le nombre **d'hospitalisations**, toutes causes confondues, est le deuxième indicateur (après les décès) le plus souvent utilisé pour analyser les impacts des canicules sur la santé. Cependant, les études ayant utilisées cet indicateur sont peu nombreuses et leurs conclusions, divergentes. Certaines ont révélé que les vagues de chaleur ont provoqué des augmentations significatives des hospitalisations, peu importe les causes, de 2 à 11 % (Semenza *et al.*, 1999; Jones *et al.*, 1982), mais trois autres études plus récentes n'ont trouvé aucune hausse significative (Nitschke *et al.*, 2007; Nitschke *et al.*, 2011; Kovats *et al.*, 2004). Au Québec, de 2010 à 2015, aucun effet significatif sur le taux brut des hospitalisations toutes causes confondues n'a été identifié lors des vagues de chaleur ayant frappé la province (Bustanza et Lebel, 2012; Bustanza *et al.*, 2013; Lebel et Bustanza, 2013; Bustanza *et al.*, 2014; Bustanza *et al.*, 2015; Lebel *et al.*, 2016). Pour expliquer cette absence de corrélation entre les vagues de chaleur et les hospitalisations, des chercheurs ont émis l'hypothèse que la chaleur extrême provoquerait des décès d'origine cardiovasculaire survenant très rapidement, soit avant que les patients puissent se rendre dans les hôpitaux (Mastrangelo *et al.*, 2006; Diaz *et al.*, 2006; Kovats *et al.*, 2004). À l'heure actuelle, il n'y pas de système d'alerte connu utilisant des seuils calculés à partir de données d'hospitalisation toutes causes confondues.

En ce qui a trait aux transports ambulanciers (troisième indicateur sanitaire potentiel), on a déjà observé des augmentations significatives, de 4 % à 16 %, durant les vagues de chaleur, en Australie et au Canada (Nitschke *et al.*, 2007;

Nitschke *et al.*, 2011; Dolney et Sheridan, 2006). Ainsi, il est intéressant de noter que cet indicateur représente une alternative pour des fins de veille des impacts sanitaires des vagues de chaleur, lorsque les données de mortalité ne sont pas rapidement disponibles ou dans les régions administratives avec un nombre peu élevé de décès. Au Québec, cinq des dix régions administratives ayant connu des vagues de chaleur extrême lors des saisons estivales de 2012 et 2013, ont montré une augmentation significative des transports ambulanciers (de l'ordre de 15 %) pendant ces épisodes (Lebel et Bustanza, 2013; Bustanza *et al.*, 2014), incluant tant des régions peu peuplées et peu urbanisées, que des régions urbanisées plus peuplées. Comme pour l'indicateur d'hospitalisations toutes causes confondues, il n'existe pas de système d'alerte utilisant des seuils obtenus à partir des données de transports ambulanciers. Cependant, l'utilisation de cet indicateur pour la veille des vagues de chaleur est prometteuse étant donné que ses variations journalières semblent refléter celles de la température (Dolnet et Sheridan, 2006; Nitschke *et al.*, 2011) et qu'il est généralement disponible en temps réel ou quasi-réel.

Enfin, pour ce qui concerne l'impact de la chaleur sur les **admissions à l'urgence**, les résultats des études sont peu explicites. Dans la région rurale du sud de l'Ontario, les visites à l'urgence augmentent à certains endroits et pas à d'autres pendant une vague de chaleur jusqu'à environ 11 % par comparaison à des périodes normales sans canicules (Bishop-Williams *et al.*, 2015). Aux États-Unis, pendant la vague de chaleur de 2012, aucun lien significatif entre la vague de chaleur et les admissions à l'urgence n'a été décelé (Levy *et al.*, 2015). De plus, d'autres études rapportent aussi des résultats mitigés (Sun *et al.*, 2014; Schaffer *et al.*, 2012). Bien que les admissions à l'urgence ne semblent pas être un indicateur adéquat pour lancer des alertes, il est potentiellement utile pour moduler la réponse des décideurs en santé publique pendant les vagues de chaleur, alors que cet indicateur est disponible en temps réel.

6.3 IDENTIFICATION DE GROUPES VULNÉRABLES

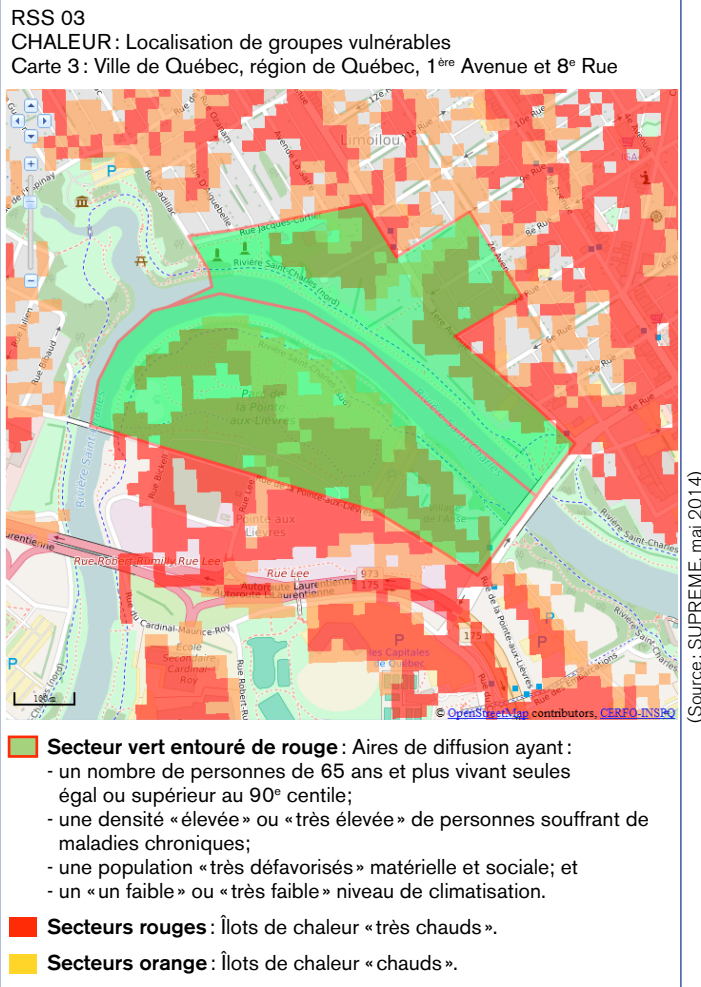
Un autre groupe d'indicateurs intéressants, liés au **milieu de vie**, a trait au fait de vivre dans les grands centres urbains. Ce facteur serait responsable d'une mortalité toutes causes confondues plus élevée lors des canicules que lorsque les personnes résident dans des petites villes ou à la campagne (Jones *et al.*, 1982). L'une des causes de cette surmortalité est la présence d'ICU (cf. section 5), générés par les revêtements asphaltés, le grand nombre d'infrastructures et la densité de la population (Haines *et al.*, 2006; Kovats et Hajat, 2008; Lubet et McGeehin, 2008). Également, le fait de vivre dans un vieux bâtiment (possiblement mal isolé ou délabré) ou dans un petit logement, souvent mal ventilé, a été associé à des décès chez les 65 ans et plus durant la canicule de

2003 en France (Vandentorren *et al.*, 2006). Quelques études ont mis en évidence la surmortalité lors de vagues de chaleur chez les gens moins fortunés ou peu scolarisés (Basu et Samet, 2002; Kovats et Hajat, 2008; Curriero *et al.*, 2002; O'Neill, 2003) ainsi qu'une surmorbidity ressentie et une consommation élevée de consultations médicales (Bélanger *et al.*, 2015a) en lien avec le logement et le quartier.

Bien que les effets sur la santé touchent tous les **groupes d'âges**, certaines personnes vulnérables sont plus à risque que d'autres (D'Ippoliti *et al.*, 2010; Kovats et Hajat, 2008). Il s'agit, entre autres, des personnes âgées, des enfants, des personnes avec des maladies chroniques ainsi que des personnes pratiquant des métiers extérieurs, donc exposées aux aléas météorologiques (OMS, 2008). Bien que les enfants de moins de cinq ans aient été identifiés comme un groupe à risque (Ledrans et Isnard, 2003), ce risque est relativement faible dans les pays industrialisés (CDC, 2002). Finalement, **les problèmes de santé chronique préexistants**, comme les maladies cardiovasculaires, respiratoires ou mentales, ont également été mentionnés comme facteur de risque des effets sanitaires attribués à la chaleur (Kovats et Hajat, 2008; Bouchama *et al.*, 2007; Kaiser *et al.*, 2001). En résumé, une revue des études épidémiologiques sur les effets du temps chaud sur la santé publique dans plusieurs régions du monde (Kovats et Hajat, 2008), confirme que la mortalité due aux canicules est plus prononcée chez les personnes âgées, mais que d'autres groupes peuvent aussi être plus à risque (jeunes enfants ou adultes avec des maladies chroniques).

L'INSPQ a produit en 2014 des cartes de vulnérabilité à la chaleur pour toutes les régions administratives du Québec, en se basant sur certains indicateurs mentionnés ci-dessus, et en utilisant l'outil cartographique du système SUPREME (cf. Encadré 3). Ces cartes identifient «les aires de diffusion»²¹ rencontrant certains critères de vulnérabilité à la chaleur. Cette information et la connaissance du terrain des équipes locales peuvent aider à la localisation des groupes vulnérables à la chaleur, et donc permettre d'y prioriser les interventions. Un exemple d'une des 12 cartes de vulnérabilité pour la région de Québec est fourni à la Figure 8. Dans cette figure, les indicateurs utilisés sont **les îlots de chaleur**, le nombre de personnes **de 65 ans et plus**, la densité de personnes souffrant de **maladies chroniques**, l'indice de **défavorisation matérielle** et le niveau de **climatisation** (estimé à partir de la consommation électrique en été).

Figure 8. Carte de vulnérabilité à la chaleur pour un secteur de la région de Québec.



²¹ Une aire de diffusion est la plus petite région géographique (regroupant de 400 à 700 personnes en moyenne) pour laquelle toutes les données du recensement canadien sont diffusées (<https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/ref/dict/geo021-fra.cfm>).

6.4 ANALYSE DE L'ASSOCIATION ENTRE LES INDICATEURS SANITAIRES ET LES PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES

Comme il a été mentionné précédemment, le délai entre l'exposition à la chaleur et le décès peut s'avérer assez bref, d'où l'importance de mettre en place un système de veille et d'avertissement précoce lors de fortes chaleurs, basé sur les prévisions météorologiques. À la suite de plusieurs événements de canicule à travers le monde, plusieurs systèmes d'alerte ont été développés afin de prévenir les mortalités reliées à ces événements. Ces systèmes se basent, en général, sur l'établissement de seuils des paramètres météorologiques significatifs, habituellement la température ou des indices dérivés de celle-ci (tel que discuté aux sections 2, 3 et 4), qui entraînent une surmortalité importante (Ledrans et Isnard, 2003; Nicholls *et al.*, 2008).

L'analyse des associations entre les indicateurs sanitaires et les paramètres météorologiques repose sur l'identification de seuils à partir desquels une vague de chaleur pourrait entraîner un excès significatif de la fréquence d'un problème de santé particulier. Pour déterminer un impact significatif sur la santé, on compare la fréquence du problème de santé pendant la période où certains seuils sont dépassés (vagues de chaleur) par rapport aux périodes sans dépassement (périodes de contrôle). Ainsi deux types de seuil entraînant une hausse significative de la fréquence du problème de santé sont déterminés : 1) La valeur-seuil du paramètre météorologique, et 2) La durée-seuil de l'exposition à cette valeur-seuil (Litvak *et al.*, 2005; Chebana *et al.*, 2013). De plus, certains critères sont nécessaires pour pouvoir analyser adéquatement cette association : l'unité géographique analysée doit être homogène du point de vue climatique, les tendances historiques des indicateurs utilisées doivent être ajustées, les excès sanitaires doivent être spécifiques aux vagues de chaleur, et l'analyse des liens doit tenir compte du temps de latence entre l'exposition et le début des impacts.

Au Québec, des seuils de chaleur extrême spécifiques pour chacune des régions administratives (présentés à l'*Annexe E, Tableau E.1*) ont été établis par l'INRS (Institut National de la Recherche Scientifique, centre Eau-terre-Environnement) et l'INSPQ en 2009 en utilisant des informations météorologiques et sanitaires disponibles sur la période historique 1981-2005 (Chebana *et al.*, 2013). Pour définir ces seuils, il a été nécessaire de regrouper certaines régions administratives afin d'avoir des classes homogènes d'un point de vue climatique, de même qu'un nombre de décès journaliers suffisamment élevé pour les analyses. Des recherches sont actuellement en cours pour examiner de nouvelles méthodes statistiques qui permettraient de mieux analyser des situations de faible nombre d'événements quotidiens. De plus, les seuils utilisent les moyennes pondérées de température afin de tenir compte des incertitudes inhérentes à toutes les pré-

visions (cf. section 3, *Tableau 3*). Ces seuils de températures entraîneraient une surmortalité significative ($\geq 60\%$, ce qui est le niveau détectable statistiquement pour le Québec), justifiant un déclenchement d'alerte sanitaire. Des stations météorologiques de référence pour chaque région administrative ont aussi été identifiées afin de permettre un suivi des conditions météorologiques générales dans chacune d'entre elles.

SYSTÈME SUPREME

Au Québec, l'INSPQ a implanté le système SUPREME (présenté à l'*Annexe B*) en 2010 (Toutant et al, 2011; Bustinza et al, 2011). Lors de canicules, ce système envoie des avertissements automatisés de chaleur extrême, selon la région météorologique²², à l'intention des intervenants en santé publique, des municipalités et de la sécurité civile, lorsque les moyennes pondérées des températures prévues au cours des prochains jours atteignent les seuils de chaleur extrême, tels que présentés au *Tableau E.1* de l'*Annexe E*.

Le système SUPREME permet entre autres d'intégrer différentes sources d'informations et propose aussi un ensemble de renseignements et d'indicateurs utiles aux répondants régionaux et ministériels pour les interventions à venir. Parmi les composantes du système, on trouve, par exemple, de l'information quotidienne en temps quasi-réel sur certains indicateurs sanitaires (décès, hospitalisations, admissions aux urgences, transports ambulanciers, etc.), sociodémographiques (densité de population, revenu, proportion d'immigrants, etc.), environnementaux (îlots de chaleur urbains, pollution atmosphérique), en plus des prévisions et alertes météorologiques (températures, précipitations, verglas, orages, etc.) émises par ECCC.

LA PERFORMANCE DU SYSTÈME D'AVERTISSEMENTS

Pour analyser la fiabilité des avertissements de chaleur extrême, l'INSPQ étudie présentement la qualité des prévisions utilisées pour détecter des périodes de chaleur extrême. Cependant, il est compliqué d'évaluer la qualité des prévisions des événements météorologiques rares étant donné que les mesures traditionnelles de la qualité des prévisions dégénèrent typiquement vers de valeurs banales (tendance vers le zéro) lorsque la rareté de l'événement prévu augmente (Ferro et Stephenson, 2011). Pour vérifier les prévisions du système SUPREME, l'INSPQ a donc utilisé l'indice de dépendance extrême symétrique (SEDI est l'acronyme anglais) proposé par Ferro et Stephenson; cette mesure ne dégénère pas et elle est indépendante de la rareté de l'événement. Le SEDI décrit l'association entre la prévision et l'événement rare observé; l'index a une étendue fixe entre -1 et 1, où 0 indique l'absence de dépendance et 1 le score parfait.

Afin d'établir si un avertissement a correctement prévu les périodes de chaleur extrême, on compare les dates d'émission des avertissements avec les dates de début des périodes de chaleur extrême. Un avertissement est considéré «correct» s'il est émis au moins deux jours avant le début d'une période de chaleur extrême, et au plus tard le jour du début de cet épisode; tous les autres avertissements sont classés comme «erroné». Une période de chaleur extrême est identifiée lorsque les moyennes des températures maximales et minimales, observées dans les stations de références des régions météorologiques, atteignent les seuils de chaleur extrême (cf. *Tableau E.1, Annexe E*) durant deux ou trois jours consécutifs (deux jours pour certaines régions administratives et trois jours pour les autres).

Entre 2010 et 2015, pour l'ensemble des régions météorologiques d'ECCC au Québec, le système SUPREME a émis 77 avertissements de chaleur extrême basés sur les prévisions d'ECCC dont 44 étaient «corrects» et 33 «erronés», alors que 93 périodes de chaleur extrême sont réellement survenues. La capacité du système SUPREME à détecter les périodes de chaleur extrême basés sur les prévisions obtient un très bon score SEDI de 0,83 avec une erreur standard de 0,03; cela indique une très bonne association entre les prévisions et les périodes de chaleur extrême observées. Par ailleurs, le taux de fausses alarmes est de 43 % (33 avertissements erronés sur 77 émis)²³.

Les évaluations menées sur le système montrent que les responsables des régions administratives semblent satisfaits de cette performance. L'incertitude liée aux prévisions météorologiques (le taux de succès au jour 3 de la prévision de température est de 89 % l'été, avec une marge d'erreur de ± 3 °C) nous incite à une certaine réserve quant aux TFA optimaux qu'il est possible d'atteindre, du moins dans le contexte du climat canadien. En effet, la forte variabilité spatio-temporelle des températures sur le territoire canadien (cf. *Figures C.1* et *C.2, Annexe C*), constitue un défi additionnel pour les prévisionnistes. En résumé, le système d'alerte SUPREME, basé sur les prévisions et alertes émises par ECCC (et nos seuils basés sur le risque de décès), permet une veille et un déclenchement d'alertes par les autorités de santé publique en temps opportun.

22 Une région météorologique est une unité géographique homogène du point de vue météorologique conçue et établie par Environnement Canada.

23 Bustinza et Gosselin, INSPQ, communication personnelle, octobre 2016; publication prévue pour 2017.

En conclusion, l'identification de seuils adéquats est une étape essentielle à la mise en place d'un système d'alerte. Un système de surveillance canicule doit être en mesure d'émettre une alerte lorsque l'occurrence d'une période de chaleur ayant le potentiel d'avoir un impact significatif sur la santé est imminente. Deux étapes sont importantes pour mettre en place un tel système : le choix d'indicateurs météorologiques et de santé, et l'analyse des associations entre ces deux paramètres. Pour bien choisir les indicateurs météorologiques et sanitaires, leur lien doit avoir été établi solidement dans des études épidémiologiques, les données doivent être disponibles sur une base quotidienne et les prévisions météorologiques doivent être aussi exactes ou fiables que possible. Finalement, pour une analyse adéquate, l'unité géographique doit être homogène du point de vue climatique, les tendances historiques doivent être ajustées, les répercussions sanitaires doivent être spécifiques aux canicules, et l'analyse des liens doit tenir compte du délai entre l'exposition (début de la canicule) et le début des impacts sanitaires.

Au Québec, depuis 2010, une définition opérationnelle des vagues de chaleur extrême est utilisée par les DSP du Québec. Le système SUPREME envoie des avertissements lorsque les prévisions des températures sur deux ou trois jours atteignent certains seuils. Le but de ces avertissements est de permettre aux DSP de mettre en place en temps opportun des mesures de prévention, et de protection de la santé de la population.

7. Résumé et recommandations des auteurs

Les effets négatifs sur la santé des événements de chaleur extrême au Canada seront amplifiés dans le futur, en raison notamment de l'augmentation plausible de la fréquence, de l'intensité et de la durée des canicules dans le contexte du changement climatique (IPCC, 2013), alors que la population vieillissante augmente et que l'effet des ICU devrait s'accroître, en raison de l'urbanisation grandissante. Davantage d'efforts sont donc nécessaires pour parvenir à une approche nationale orientée sur les préoccupations régionales (p. ex., système d'alerte adapté aux besoins locaux) qui inclurait la quantification des risques d'occurrence de canicule, en prenant en compte des facteurs de vulnérabilité sanitaire, socio-économique ou environnementale (p. ex., maladies chroniques, démographie en évolution, densification urbaine, milieu de vie, etc.) Les efforts d'atténuation et d'adaptation (ex., toits verts, augmentation de la surface végétalisée dans les villes, etc.) doivent aussi être pris en considération alors que ceux-ci aident à réduire les ICU et ICIU, ces derniers exacerbant la chaleur ambiante.

Les recommandations suivantes découlent donc de ce contexte :

- Premièrement, adopter une terminologie standard et utiliser un vocabulaire commun (SMC, autorités sanitaires, recherche, etc.) afin de faciliter l'échange d'informations et l'interprétation résultant des conditions météorologiques/climatiques et de leur impact sur la santé;
- Identifier des seuils différents selon les régions climatiques : Le SMC doit ajuster ses seuils d'avertissement de chaleur aux seuils définis par les autorités sanitaires provinciales (grâce à des études épidémiologiques), selon les particularités locales. Par exemple, des seuils différents doivent être définis pour Sept-Îles vs Montréal, comme il a été fait pour Thunder Bay vs Toronto (cf. *Tableau 2*); ces seuils doivent aussi être régulièrement réévalués, sur la base des données les plus récentes (sanitaires, climatiques et PNT);
- Identifier des seuils appropriés au Nunavut et autres territoires nordiques/arctiques. L'adaptation physiologique des communautés nordiques n'est pas la même que pour les gens vivant plus au sud, et de plus, en été, l'en-

soleillement continu résulte en des T_{min} relativement élevées. Les conditions socioéconomiques précaires de ces populations ajoutent également à leur vulnérabilité. Cependant, ces seuils sont pour l'instant difficiles à définir, à cause de la rareté des épisodes de chaleur et du peu de personnes exposées; dans l'intervalle, des seuils d'alerte basés sur la climatologie (p. ex., T_{max} ≥ T_{max90p}), et un plan d'action « chaleur » de base devraient à tout le moins être mis en place;

- Définir des seuils « flexibles » selon le moment ou la période de l'année : Par exemple, une vague de chaleur en mai peut avoir plus d'impact que les mêmes conditions en juillet, car l'organisme n'aura pas eu le temps de s'adapter à la chaleur au printemps;
- Émettre des notifications précoces (en temps opportun) pour déclencher des plans d'action chaleur-santé efficaces chez les populations vulnérables, notamment en zone urbaine et périurbaine. En général, la signature synoptique de canicules intenses et étendues est identifiable jusqu'à une semaine à l'avance. Des bulletins météorologiques à long préavis, incluant les incertitudes, doivent être émis, à l'intention des autorités de santé publique et des autres partenaires;
- Développer des indicateurs de l'efficacité des mesures d'atténuation reflétant le but ultime, c'est-à-dire réduire la surmortalité et la surmorbidity des populations;
- Évaluer et vérifier de façon plus systématique les températures prévues versus les valeurs mesurées, et ce sur des régions, plutôt qu'à des stations (mesure ponctuelle) qui ne sont pas nécessairement représentatives de larges secteurs géographiques. Les prévisions et les informations pour les autorités sanitaires devraient inclure les effets locaux à l'intérieur des régions climatiques, menant à des différences de température de plusieurs degrés (en plus ou en moins). La variabilité des températures nocturnes doit également être mieux représentée dans les avertissements et/ou les informations transmises;

- Utiliser le cas échéant des indices biométéorologiques plus complets, comme l'indice UTCI, si les informations nécessaires sont disponibles (cf. section 5, *Figure 7*).

En ce qui a trait à l'accessibilité des données et à l'intégration des différentes sources d'informations (météorologiques et sanitaires) dans le suivi des conditions et l'émission d'avertissements, il est recommandé de :

- Faciliter l'accès et optimiser l'utilisation d'informations météorologiques à haute résolution spatiale et temporelle (données quotidiennes, voire horaires), incluant les réseaux d'observation publics et privés, et tirer profit de produits expérimentaux, ou encore en développement (p. ex., données Daymet à haute résolution; cf. *Figure 2*);
- Procéder en continu au suivi et à l'analyse des conditions météorologiques et sanitaires en zones urbaines et périurbaines, étant donné que :
 - Un nombre croissant de canicules pourrait conduire à une augmentation de la mortalité en milieu urbain, comme l'ont démontré de nombreuses études, notamment en 2003 en Europe ou en 2010 au Québec.
 - L'exacerbation du réchauffement dans les zones urbaines (ICU et ICIU) aura également des incidences sur le besoin résidentiel de refroidissement ou de systèmes d'air climatisé (demande énergétique accrue).
- Anticiper le besoin croissant en informations météorologiques et climatiques dans les zones urbaines et périurbaines environnantes, afin de fournir des données de référence sur une base régulière.

Il est certain que la mortalité liée à la chaleur peut se produire sous les seuils établis, et qu'une prévention appropriée est nécessaire, même lorsque les critères d'avertissement ne sont pas atteints (comme le suggèrent les travaux récents de Pascal *et al.*, 2013). De plus, la communication des risques, la diffusion de conseils de comportement et le soutien communautaire doivent être mis en œuvre avant et durant les canicules. Durant de tels événements, des paramètres autres que la température (maximale ou minimale), par exemple l'humidité, la pollution atmosphérique, les événements sociaux ou encore la surveillance des données de santé, doivent également être non seulement disponibles mais aussi utilisés par les autorités sanitaires, pour moduler les décisions, les interventions ou les avertissements.

En plus de définir des seuils (en collaboration avec les autorités sanitaires), le SMC devrait poursuivre son travail de sensibilisation et d'éducation auprès des parties prenantes (y compris les médias), des décideurs et de la population en général, pour les aider à mieux comprendre le système d'avertissement, et quelles actions préventives devraient être

prises. L'adaptation à la chaleur inclut aussi les comportements individuels qui peuvent être mesurés et suivis dans le temps; un premier indice d'adaptation à la chaleur a d'ailleurs été proposé pour les milieux urbains (Bélanger *et al.*, 2015b) dans ce but.

Il y a certainement un besoin de plus de recherche en matière d'adaptation et d'acclimatation des populations, afin de mettre à jour les systèmes d'alerte sur une base régulière. Des plans d'action et des systèmes d'avertissements efficaces offrent la possibilité de relever les défis futurs en ce qui a trait aux problèmes sanitaires associés aux changements climatiques. Les priorités stratégiques devraient également inclure la recherche en modélisation urbaine ainsi que des campagnes de mesure dans les grands centres urbains (afin de raffiner l'identification des ICIU). Enfin, un travail similaire est nécessaire par rapport au temps froid, lequel est également responsable d'une surmortalité importante, à l'échelle mondiale et nationale.

Les caractéristiques démographiques et socioéconomiques de la population telles que l'âge, le revenu, le milieu de vie, l'éducation et la santé en général affectent la mortalité liée à la chaleur. Dans cette perspective, il serait important d'évaluer l'impact potentiel des chaleurs récurrentes et plus sévères dans le futur selon les projections démographiques disponibles (sans doute à développer) au Canada (comme le suggère l'étude récente aux États-Unis de Jones *et al.*, 2015). Des analyses ultérieures, quant à l'exposition aux conditions climatiques extrêmes des populations, bénéficieront sans nul doute de l'amélioration continue dans les projections spatiales prenant en compte le vieillissement continu de notre population, ainsi que dans les prévisions météorologiques et les projections climatiques disponibles à haute résolution. Pour que cela se réalise, un travail concerté de collaboration entre plusieurs institutions et comprenant des expertises variées sera nécessaire.

Références

- Anderson, B. G., Bell, M. L. (2009) Weather-related mortality: how heat, cold, and heat waves affect mortality in the United States, *Epidemiology*, Vol. 20, No. 2, pp. 205-213. En ligne : PM : 19194300.
- Adam-Poupart, A., Labrèche, F., Smargiassi, A., Duguay, P., Busque, M.A., Gagné, C., Zayed, J. (2012) Impacts des changements climatiques sur la santé et la sécurité des travailleurs. Projets spéciaux, Études et recherches, Rapport R-733, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), 45 p.
- Aström C., Orru H., Rocklöv J., Strandberg G., Ebi K.L., Forsberg B. (2013) Heat-related respiratory hospital admissions in Europe in a changing climate: a health impact assessment. *BMJ Open*; 3: e001842.
- Barnett, A.G., Tong, S., Clements, A.C.A. (2010) What measure of temperature is the best predictor of mortality? *Environ. Res.*, 110, 604–611.
- Basara, J.B., Hall, P.K., Schroeder, A., Illston, B.G., et Nemunaitis, K.L. (2008) The diurnal cycle of the urban heat island in Oklahoma City. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres* 113: D20109, DOI: 10.1029/2008JD010311.
- Basara, J.B., Basara, H.G., Illston, B.G., et Crawford, K.C. (2010) The impact of the urban heat island during an intense heat wave in Oklahoma City. *Advances in Meteorology*, 230365, DOI: 10.1155/2010/230365.
- Basu, R., Samet, J. M. (2002) Relation between elevated ambient temperature mortality: a review of the epidemiologic evidence, *Epidemiologic Reviews*, Vol. 24, No. 2, pp. 190-202.
- Bélanger D., Gosselin P., Valois P., Abdous B. (2015a) Neighbourhood and dwelling characteristics associated with the self-reported adverse health effects of heat in most deprived urban areas: A cross-sectional study in 9 cities, *Health & Place*, DOI: 10.1016/j.healthplace.2014.12.014 Vol. 32, No. March, pp. 8-18.
- Bélanger D., Abdous B., Gosselin P., Valois P. (2015b) An adaptation index to high summer heat associated with adverse health impacts in deprived neighborhoods. *Climatic Change*. 132:279–293, <http://link.springer.com/article/10.1007/s10584-015-1420-4>.
- Bergeron, O. (2012) Characterizing intra-urban temperature variability using a geostatistical approach. ICUC8-8th International Conference on Urban Climate, 6th-10th August, 2012, UCD, Dublin, Ireland.
- Bishop-Williams, K.K., Berke, O., Pearl, D.L., Kelton, D.F. (2015) A spatial analysis of heat stress related emergency room visits in rural Southern Ontario during heat waves, *BMC Emerg Med*, Aug 6;15:17.
- Bouchama, A., Dehbi, M., Mohamed, G., Matthies, F., Shoukri, M., Menne, B. (2007) Prognostic factors in heat wave related deaths: a meta-analysis, *Arch. Intern. Med*, Vol. 167, No. 20, pp. 2170-2176. En ligne : PM : 17698676.
- Bourque Denis, communication personnelle, février 2015.
- Bouwer, L.M. (2013) Projections of Future Extreme Weather Losses Under Changes in Climate and Exposure. *Risk Analysis*, Vol. 33, No. 5, 9DOI: 10.1111/j.1539-6924.2012.01880.x.
- Brier, G. W. (1950) Verification of forecasts expressed in terms of probability. *Mon. Wea. Rev.*, 78, 1-3.
- Bristow, K.L. and G.S. Campbell (1984) On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 31: 159-166.
- Bryson, R.A., Ross, J.E. (1972) The climate of the city, Ch. 3 in *Urbanization and Environment*, Detwyler, T. R. and Marcus, M. G. (eds.) Duxbury Press, Elmont, 51-68.
- Bustanza, R., Toutant, S., Bélanger, D., Gosselin, P. (2011) Outil de vigie et surveillance des vagues de chaleur. INSPQ <http://www.inspq.qc.ca/bise/post/2010/09/02/Outil-de-vigie-et-surveillance-des-vagues-de-chaleur.aspx>
- Bustanza, R., Lebel, G. (2012) Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec – Bilan de la saison estivale 2011, Institut national de santé publique du Québec. En ligne : https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1508_SurImpactsSaniVaguesChaleurExtremeQc_Bilan2011.pdf
- Bustanza, R., Lebel, G., Gosselin, P., Belanger, D., Chebana, F. (2013) Health impacts of the July 2010 heat wave in Quebec, Canada, *BMC Public Health*, Vol. 13, p. 56. En ligne : PM:23336593.
- Bustanza, R., Lebel, G., Dubé, M. (2014) Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec – Bilan de la saison estivale 2013, Institut national de santé publique du Québec; *Bulletin d'information en santé environnementale*, Québec.
- Bustanza, R., Lebel, G., Dubé, M. (2015) Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec – bilan de la saison estivale 2014, Institut national de santé publique du Québec; *Bulletin d'information en santé environnementale*, Québec.
- Bustanza et Gosselin, INSPQ, communication personnelle, juin 2015.
- Casati, B., L.J. Wilson, D.B. Stephenson, P. Nurmi, A. Ghelli, M. Pocernich, U. Damrath, E.E. Ebert, B.G. Brown and S. Mason (2008) Forecast verification: current status and future directions. *Meteorol. Appl.*, 15, 3-18.
- Casati, B., Yagouti, A., Chaumont, D. (2013) Regional Climate Projections of Extreme Heat Events in Nine Pilot Canadian Communities for Public Health Planning. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52, 2669- 2698, DOI: 10.1175/JAMC-D-12-0341.1.
- Cassadou, S., Chardon, B., D'Helf, M., Declercq, B., Eilstein, D., Fabre, P., *et al.* (2004) Vague de chaleur de l'été 2003: relations entre températures, pollution atmosphérique et mortalité dans neuf villes françaises. Rapport d'étude [in French]. Saint-Maurice, France: Institut de veille sanitaire; 44 p.: http://www.invs.sante.fr/publications/2004/psas9_070904/rapport.pdf
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC) (2002) Heat-related deaths -four states, July-August 2001, and United States, 1979--1999, *Morbidity and mortality weekly report*, Vol. 51, No. 26, pp. 567-570: <http://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/mm5126a2.htm>
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC) (2008). Heat-related deaths among crop workers-United States, 1992–2006. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep* 2008; 57: 649–53.
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC) (2012). Climate change and extreme heat events. Centers for Disease Control and Prevention, National Center for Environmental Health, 20 p. (cf. <http://www.cdc.gov/climateandhealth/pubs/ClimateChangeandExtremeHeatEvents.pdf>).

- Chebana, F., Martel, B., Gosselin, P., Giroux, J. X., Ouarda, T. B. (2013) A general and flexible methodology to define thresholds for heat health watch and warning systems, applied to the province of Quebec (Canada), *Int J Biometeorol*, Vol. 57, No. 4, pp. 631-644. En ligne : <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00484-012-0590-2>.
- Cheung, H.K.W. (2011) An urban heat island study for building and urban design. Thèse : School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering. 273 p.
- Cohen, J. *et al.*, (2014) Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather, *Nature Geoscience*, 17 August 2014, DOI: 10.1038/NNGEO2234.
- Confalonieri, U., B. Menne, R. Akhtar, K.L. Ebi, M. Hauengue, R.S. Kovats, B. Revich, and A. Woodward (2007) Human health. In *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Curriero, F. C., Heiner, K. S., Samet, J. M., Zeger, S. L., Strug, L., Patz, J. A. (2002) Temperature and mortality in 11 cities of the eastern United States., *American Journal of Epidemiology*, Vol. 155, No. 1, pp. 80-87.
- Diaz, J., Linares, C., Tobias, A. (2006) A critical comment on heat wave response plans. *Eur J Public Health*, Vol. 16, No. 6, p. 600.
- D'Ippoliti *et al.* (2010) The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from the EuroHEAT project. *Environmental Health* 2010, 9: 37, <http://www.ehjournal.net/content/9/1/37>
- Dolney, T. J., Sheridan, S. C. (2006) The relationship between extreme heat and ambulance response calls for the city of Toronto, Ontario, Canada, *Environmental Research*, Vol. 101, No. 1, pp. 94-103. En ligne : PM:16225860.
- Dousset, B., Gourmelon, F., Giraudet, E., Laaïdi, K., Zeghnoun, A., Bretin, P., *et al.* (2011) Évolution climatique et canicule en milieu urbain. Apport de la télé-détection à l'anticipation et à la gestion de l'impact sanitaire. 82 p.
- Ekos Research Associates Inc. (2007) National WES Products and Services Survey 2007. Final report.
- Ekos Research Associates Inc. (2011) Weather and Environmental Services Quality of Service Survey 2011. Final report.
- Environnement et Changement climatique Canada (2014) Critères d'alertes météo publiques; <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.aspx?lang=Fr&n=d9553ab5-1#chaleur> (consulté le 20 février 2015).
- Environnement et Changement climatique Canada (2015a) EC Ontario Heat Warnings SOPs Final V 2.1 (consulté en juillet 2015).
- Environnement et Changement climatique Canada (2015b) Les phénomènes météorologiques les plus importants du 20e siècle <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.aspx?lang=Fr&n=6a4a3ac5-1> (consulté le 15 juillet 2015).
- EPA (2006) Excessive Heat Events Guidebook. En ligne : http://www.epa.gov/heatisland/about/pdf/EHEguide_final.pdf (consulté le 25 mai 2015).
- Epstein, Y., Moran, D.S. (2006) Thermal comfort and the heat stress indices. *Ind. Health* 44: 388-398.
- Eyre, J.R. (2007) Progress achieved on assimilation of satellite data in numerical weather prediction over the last 30 years. ECMWF Seminar on Recent development in the use of satellite observations in NWP; 3-7 September 2007
- Fajman, P.J.W. (2011) Improved verification and analysis of National Weather Service point forecast matrices. PhD Thesis. University of Nebraska.
- Ferro, C.A. et Stephenson, D.B. (2011) Extremal Dependence Indices: Improved verification measures for deterministic forecasts of rare binary events. *Weather and Forecasting*, Vol. 26, No. 5, pp 699-713, DOI: 10.1175/WAF-D-10.05030.1.
- Fiala, D., Lomas, K.J., Stohrer, M. (2001) Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *Int J Biometeorol* 45(3): 143-159. DOI: 10.1007/s004840100099.
- Fiala, D., Havenith, G., Broede, P., Kampmann, B., Jendritzky, G. (2012) UT-CI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *Int J Biometeorol* 56(3):429-441. DOI: 10.1007/s00484-011-0424-7.
- Flatau, P.J., Walko, R.L., Cotton, W.R. (1992) Polynomial fits to saturation vapor pressure. *J Appl Meteor* 31: 1507-1513.
- Folland, C.K., Horton, E.B., Scholefield P., (Eds) (1999) Report of WMO Working Group on Climate Change. Detection Task Group on Climate Change Indices, Bracknell, 1 September, 1998, WMO TD 930.
- Fouillet, A., Rey, G., Laurent, F., Pavillon, G., Bellec, S., Guihenneuc-Jouyaux, C., Clavel, J., Jougla, E., Hemon, D. (2006) Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *Int Arch Occup Environ Health* 80: 16-24.
- Frich, P., Alexander, L.V., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A.M.G and Peterson, T. (2002) Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19: p.193-212.
- Gachon, P., St-Hilaire, A., Ouarda, T., Nguyen, V.T.V., Lin, C., Milton, J., Chaumont, D., Goldstein, J., Hessami, M., Nguyen, T.D., Selva, F., Nadeau, M., Roy, P., Parishkura, D., Major, N., Choux, M., Bourque, A. (2005) A first evaluation of the strength and weaknesses of statistical downscaling methods for simulating extremes over various regions of eastern Canada. Sub-component, Climate Change Action Fund (CCAF), Environment Canada, Final report, Montréal, Québec, Canada, 209 pp.
- Gasparrini, A., Armstrong, B. (2011) The impact of heat waves on mortality. *Epidemiology*. 2011 January; 22(1): 68-73. DOI: 10.1097/EDE.0b013e3181fcd999.
- Gasparrini, A., *et al.* (2015) Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: A multi-country study. *The Lancet*. [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0).
- Goodess, C.M., (2003) STATistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions: STARDEX. The EGGS, Issue No. 6, 10 December 2003.
- Gov. UK (2015) Heatwave Plan for England: Protecting Health and Reducing Harm from Extreme Heat and Heatwaves. Disponible sur : https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/429384/Heatwave_Main_Plan_2015.pdf (consulté le 20 mars 2015).
- Haines, A., Kovats, R. S., Campbell-Lendrum, D., Corvalan, C. (2006) Climate change and human health: Impacts, vulnerability and public health, *Public Health*, Vol. 120, pp. 585-596.
- Hajat S., Sheridan S.C., Allen, M.J., Pascal, M., Laaïdi K., Yagouti A., *et al.* (2010) Heat-health warning systems: a comparison of the predictive capacity of different approaches to identifying dangerously hot days. *Am J Public Health* 100(6): 1137-1144.
- Hayhoe, K., Cayan, D., Field, C.B., Frumhoff, P.C., Maurer, E.P., Miller, N.L., Moser, S.C., Schneider, S.H., Cahill, K.N., Cleland, E.E., Dale, L., Drapek, R., Hanemann, R.M., Kalkstein, L.S., Lenihan, J., Lunch, C.K., Neilson, R.P., Sheridan, S.C., Verville, J.H. (2004) Emissions pathways, climate change, and impacts on California. *PNAS* 101(34): 12422-12427.
- Hemon, D., Jougla, E. (2004) La canicule du mois d'août 2003 en France. *Rev. Epidemiol. Santé Publique* 52:3-5 : http://www.invs.sante.fr/content/download/14806/84540/version/1/file/rapport_final_canicule.pdf
- Hoeppe, P. (1999) The physiological equivalent temperature-a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int. J. Biometeorol* 43(2): 71-75.
- Hopkinson, R. F., McKenney, D., *et al.* (2011) Impact of Aligning Climatological Day on Gridding Daily Maximum-Minimum Temperature and Precipitation over Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 50: 1654-1665.
- Hutchinson, M., McKenney, D.W., Lawrence, K. and Pedlar J.H. (2009) Development and testing of Canada-wide interpolated spatial models of daily minimum-maximum temperature and precipitation for 1961-2003, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48, 725-741.
- InVS (2005) http://www.invs.sante.fr/publications/2005/sacs_2005/rapport_sacs_2005.pdf (consulté le 31 Octobre 2015).

- IPCC (2012) Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC (2014) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 688.
- Jendritzky G, Havenith G, Weihs P, Batchvarova E (eds) (2009) Towards a Universal Thermal Climate Index (UTCI) for assessing the thermal environment of the human being. Final Report, COST Action Brussels. Available at http://w3.cost.eu/fileadmin/domain_files/ESSEM/Action_730/final_report/final_report-730.pdf (consulté le 20 mai 2015).
- Jones, T., Liang, A., Kilbourne, E. (1982) Morbidity and mortality associated with the July 1980 heat wave in St. Louis and Kansas City, Mo. *Journal of the American Medical Association*, Vol. 247, No. 24, pp. 3327-3331.
- Jones, B., O'Neill B.C., McDaniel L., McGinnis S., Mearns L. O., Tebaldi C. (2015) Future population exposure to US heat extremes. *Nature Climate Change* Vol. 5, 652-656.
- Joslyn, S. et LeClerc, J. (2013) Decisions with Uncertainty: The Glass Half Full. *Current Directions in Psychological Science* 2013, 22: 308
- Kaiser, R., Rubin, C.H., Henderson, A., Wolfe, M.I., Kieszak, S., Parrott, C.L., Adcock, M. (2001) Heat-related death and mental illness during the 1999 Cincinnati heat wave, *American Journal of Forensic Medicine and Pathology*, Vol. 22, No. 03, pp. 303-307.
- Kjellstrom, T. *et al.* (2008) Workplace heat stress, health and productivity-an increasing challenge for low and middle-income countries during climate change, *Global Health Action*, 2.
- Klein Tank AMG, Zwiers FW, Zhang X (2009) Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. Climate data and monitoring WCDMP-No. 72. WMO-TD No. 1500. p 56.
- Klinenberg, E. (2002) *Heat Wave: A Social Autopsy of Disaster in Chicago*. Chicago: Univ. Chicago Press.
- Kosatsky, T. (2005) The 2003 European heat waves. *Euro Surveill.* 2005; 10(7): pii=552.: <http://www.eurosurveillance.org/ViewArticle.aspx?ArticleId=552>
- Kovats, R. S., Hajat, S., Wilkinson, P. (2004) Contrasting patterns of mortality and hospital admissions during hot weather and heat waves in Greater London, UK, *Occupational and environmental medicine*, Vol. 61, No. 11, pp. 893-898. En ligne: PM: 15477282.
- Kovats, R.S. and S. Hajat (2008) Heat stress and public health: a critical review. *Annual Review of Public Health*, 29, 41-55, ANRV337-PU29-09. DOI: 10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843.
- Laaidi, K., Pascal, M., Ledrans, M., Le Tertre, A., Medina, S., Caserio-Schone-mann, C., *et al.* (2004) Système d'alerte canicule et santé 2004 (Sacs 2004). Rapport opérationnel. Saint-Maurice, France: Institut de veille sanitaire; 2004. 34 p. En ligne: <http://www.invs.sante.fr/Dossiers-thematiques/Environnement-et-sante/Climat-et-sante/Chaleur-et-sante/Publications> (consulté le 17 avril 2015).
- Laaidi, K., Ung, A., Wagner, V., Beaudreau, P., Pascal, M. (2012) Système d'alerte canicule et santé: principes, fondements et évaluation. Saint-Maurice: Institut de veille sanitaire; 19 p. Disponible En ligne: <http://www.invs.sante.fr>
- La Presse 31 mai 2015: <http://www.lapresse.ca/international/asie-oceanie/201505/31/01-4874065-inde-la-canicule-fait-plus-de-2200-morts.php>
- Le Monde, 2 juillet 2015: http://www.lemonde.fr/climat/article/2015/07/02/la-canicule-touche-officiellement-plus-de-la-moitie-de-la-france_4667976_1652612.html
- Le Monde, 9 octobre 2015: http://www.lemonde.fr/sante/article/2015/10/09/3-300-deces-supplementaires-en-france-pendant-la-canicule-de-l-ete-2015_4786653_1651302.html
- Lebel, G., Bustinza, R. (2013) Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec-Bilan de la saison estivale 2012, Institut national de santé publique du Québec, Québec.
- Lebel, G., Bustinza, R., Dubé, M. (2016) Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec – bilan de la saison estivale 2015, Institut national de santé publique du Québec; Bulletin d'information en santé environnementale, Québec.
- Ledrans, M., Isnard, H. (2003) Impact sanitaire de la vague de chaleur d'août 2003 en France: bilan et perspectives, octobre 2003, Institut de Veille Sanitaire, InVS, Saint-Maurice, France.
- Leroyer S., Bélair S., Mailhot J. & Strachan I.B. (2011) Microscale Numerical Prediction over Montreal with the Canadian External Urban Modeling System. *J. Appl. Meteorology & Climatology*, vol. 50, p. 2410-2428.
- Leroyer, S., Bélair, S., Husain S., et Mailhot, J. (2014) Subkilometer Numerical Weather Prediction in an Urban Coastal Area: A Case Study over the Vancouver Metropolitan Area. *J. Appl. Meteor. Climatol*, 53, 1433-1453. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0202.1>
- Leroyer, S. et S. Bélair (2014) Urban-scale Weather Forecasting System for the 2015 PanAm Games in Toronto, World Weather Open Science Conference WWOSC, 16-21 Aug. 2014, Montréal, QC, Canada (oral presentation by S. Leroyer).
- Levy, M., Broccoli, M., Cole, G., Jenkins, J.L., Klein, E.Y. (2015) An analysis of the relationship between the Heat Index and arrivals in Emergency department, *PLoS Curr*, Oct 29;7.
- Litvak, E. *et al.* (2005) Programme de vigie et de prévention des effets de la chaleur accablante à Montréal, Automne 2005, Direction de santé publique de Montréal (DSPM), 33 pages, ISBN 2-89494-468-3.
- Lowe, Paul R. (1977) An Approximation Polynomial for the Computation of Saturation Vapor Pressure. *J. Appl. Meteor.*, 16, 100-103. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016<0100:AAPFTC>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016<0100:AAPFTC>2.0.CO;2)
- Luber, G., McGeehin, M. (2008) Climate change and extreme heat events, *American Journal of Preventive Medicine*, Vol. 35, No. 5, pp. 429-435. En ligne: PM:18929969.
- Martel B., Giroux J.X., Gosselin P., Chebana F., Ouarda T.B.M.J., Charron C., (2010) Indicateurs et seuils météorologiques pour les systèmes de veille-avertissement lors de vagues de chaleur au Québec. Institut National de Santé publique du Québec. 119 p. (<http://www.inspq.qc.ca>).
- Martin, P., Baudouin, Y., Gachon, P. (2015) An alternative method to characterize the Surface Urban Heat Island. *International Journal of Biometeorology* 59:849-861, DOI: 10.1007/s00484-014-0902-9.
- Masterson J., Richardson F. (1979) Humidex, a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity. CLI 1-79, Environment Canada, Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario.
- Mastrangelo, G., Hajat, S., Fadda, E., Buja, A., Fedeli, U., Spolaore, P. (2006). Contrasting patterns of hospital admissions and mortality during heat waves: are deaths from circulatory disease a real excess or an artifact? *Med Hypotheses*, Vol. 66, No. 5, pp. 1025-1028.

- Matthies F, Bickler, G., Cardeñosa Marín, N. et Hales, S. (2008) Heat-Health Action Plan, World Health Organization, 45 pages, ISBN 978 92 890 7191 8, disponible à : http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/95919/E91347.pdf.
- Maurer, E.P., Wood, A.W., Adam, J.C., Lettenmaier, D.P., Nijssen, B. (2002) A Long-Term Hydrologically-Based Data Set of Land Surface Fluxes and States for the Conterminous United States, *J. Climate* 15, 3237-3251.
- McGeehin, M.A., Mirabelli, M. (2001). Potential impacts of climate variability and change on temperature-related morbidity and mortality in the United States. *Environ Health Perspect*, 109:185-189.
- McKenney, D. W., Hutchinson, M.F., Papadopol, P., Lawrence, K., Pedlar, J., Campbell, K., Milewska, E., Hopkinson, R., Price, D., Owen, T. (2011) Customized spatial climate models for North America. *Bulletin of American Meteorological Society-BAMS* December: 1612-1622.
- Memon, R. A., Leung, Dennis Y. C. & Chuncho, L. (2008) A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island. *Journal of environmental sciences (China)*, 20(1), 120-128.
- Met Office (2015) Heat-health watch, <http://www.metoffice.gov.uk/public/weather/heat-health/#?tab=heatHealth> (consulté le 25 mai 2015).
- Mishra, V., Ganguly, A.R., Nijssen, B., Lettenmaier, D.P. (2015) Changes in observed climate extremes in global urban areas. *IOP Science*. En ligne. Vol 10, no 2. <http://iopscience.iop.org/1748-9326/10/2/024005/article> (consulté le 2 février 2014).
- MSSS (2006) Guide d'intervention-Chaleur accablante volet santé publique. Disponible sur : <http://www.msss.gov.qc.ca/sujets/santepub/pdf/Guide-intervention.pdf> (consulté le 14 mars 2015).
- Muller, C. L., Chapman, L., Grimmond, C. S. B., Young, D. T. et Cai, X. (2013) Sensors and the city: a review of urban meteorological networks. *Int. J. Climatol.*, 33: 1585-1600. DOI: 10.1002/joc.3678.
- Murphy, A.H. (1973) A new vector partition of the probability score. *J. Appl. Meteor.*, 12, 595-600.
- National Center for Environmental Health (U.S.) (2013) Climate change and extreme heat events, Centers for Disease Control and Prevention, National Centre for Environmental Health, 20 p., <http://stacks.cdc.gov/view/cdc/13697/>
- National Research Council (2011) Climate Stabilization Targets: Emissions, Concentrations, and Impacts over Decades to Millennia. Washington, DC: National Academies Press.
- National Weather Service: <http://w1.weather.gov/glossary/index.php?letter=h>
- Nicholls, N., Skinner, C., Loughnan, M., Tapper, N. (2008) A simple heat alert system for Melbourne, Australia, *Int J Biometeorol*, Vol. 52, No. 5, pp. 375-384. En ligne: PM: 18058138.
- Nitschke, M., Tucker, G. R., Bi, P. (2007) Morbidity and mortality during heatwaves in metropolitan Adelaide, *Medical journal of Australia*, Vol. 187, No. 11-12, pp. 662-665.
- Nitschke, M., Tucker, G. R., Hansen, A. L., Williams, S., Zhang, Y., Bi, P. (2011) Impact of two recent extreme heat episodes on morbidity and mortality in Adelaide, South Australia: a case-series analysis, *Environ Health*, Vol. 10, p. 42. Online: PM: 21592410.
- NOAA (2014) What is the heat index ? <http://www.srh.noaa.gov/ama/?n=heatindex> (consulté le 23 mars 2015).
- NOAA (2015) Natural Hazard Statistics: Weather Fatalities. National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponible sur : <http://www.weather.gov/om/hazstats.shtml> (consulté le 23 mars 2015).
- Novak, D.R., Bailey, C., Brill, K.F., Burke, P., Hogsett, W.A., Rausch, R., Schichtel, M. (2014) Precipitation and Temperature Forecast Performance at the Weather Prediction Center. *Wea. Forecasting*, 29, 489-504. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/WAF-D-13-00066.1>
- Oke, T.R., Fuggle, R.F. (1972) Comparison of urban/rural counter and net radiation at night, *Bound. Layer Met.*, 2, 290-308.
- Oke, T.R. (1982) The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, pp. 1-24.
- Oke, T.R. (1987) *Boundary Layer Climates*. New York, Routledge.
- Oke, T.R. (1997) Urban Climates and Global Environmental Change. In: Thompson, R.D. and A. Perry (eds.) *Applied Climatology: Principles & Practices*. New York, NY: Routledge. pp. 273-287.
- Oke, T.R. (2006) Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. WMO/TD-No. 1250. 2006 (instruments and reporting methods, Report No. 81). Disponible à : <https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-81/IOM-81-UrbanMetObs.pdf>.
- Oleson, K.W., Bonan, G.B., Feddema, J.J., Vertenstein, M., Kluzek, E. (2010) Technical description of an urban parameterization for the Community Land Model (CLMU). NCAR Tech Note NCAR/TN-480+STR, 169 pp. http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/clm/CLMU_Tech_Note.pdf.
- Oleson, K. W., Monaghan, A., Wilhelmi, O., Barlage, M., Brunzell, N., Feddema, J., Hu, L., Steinhoff, D. F. (2015) Interactions between urbanization, heat stress, and climate change. *Climatic Change*, 129, 3-4, 525-541.
- OMM (consulté le 1er juillet 2015, pour définition de vague de chaleur): <http://wmo.multicorpora.net/MultiTransWeb/Web.mvc>
- OMS-EURO (2008) Heat-health action plans, Guidance EURO Nonserial Publication, ed. Matthies, F., Bickler, G., Cardeñosa Marín, N., Hales, S., WHO Regional Office for Europe, ISBN-139789289071918, Genève, 55 p. En ligne: <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/107888/1/E91347.pdf>
- OMS (2009) Improving Public Health Responses to Extreme Weather/Heat-Waves-EuroHEAT: Technical Summary, http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0010/95914/E92474.pdf?ua=1 (consulté le 1er juin 2015).
- OMS (2014) <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs266/fr/> (consulté le 12 mars 2015).
- OMS-OMM (2012) Atlas de la santé et du climat, OMM-N° 1098, disponible à www.wmo.int/e-catalog, 68 p.
- O'Neill (2003) Air conditioning and heat-related health effects. *Applied Environmental Science and Public Health* 1[1], 9-12.
- Otto, F., Massey, N., Oldenborgh, G.V., Jones, R., Allen, M. (2012). Reconciling two approaches to attribution of the 2010 Russian heat wave. *Geophys Res Lett* 39: L04702.
- Palmer, T. N., Barkmeijer, J., Buizza, R., Klinker, E., Richardson, D. (2002) L'avenir de la prévision d'ensemble, *La Météorologie*-n° 36-février 2002, 22-30.
- Pappenberger, F., Jendritzky, G., Staiger, H., Dutra, E., Di Giuseppe, F., Richardson, D.S., Cloke, H.L. (2015) Global forecasting of thermal health hazards: the skill of probabilistic predictions of the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int J Biometeorol* (2015) 59: 311-323, DOI: 10.1007/s00484-014-0843-3.
- Pascal, M., Wagner, V., Le Tertre, A., Laaidi, K., Honoré, C., Bénichou, F., Beaudou, P. (2013) Definition of temperature thresholds: the example of the French heat wave warning system, *Int J Biometeorol*, 57:21-29, DOI: 10.1007/s00484-012-0530-1.
- Perkins, S. E., Alexander, L. V. (2012) On the measurement of heat waves. *J. Clim.*, 26, 4500-4517.
- Psikuta, A., Fiala, D., Laschewski, G., Jendritzky, G., Richards, M., Blazejczyk, K., Mekjavic, I., Rintamaki, H., de Dear, R., Havenith, G. (2012) Validation of the Fiala multi-node thermophysiological model for UTCI application. *International Journal of Biometeorology* 56(3): 443-460. DOI: 10.1007/s00484-011-0450-5.
- Rahmstorf, S., Coumou, D. (2011). Increase of extreme events in a warming world. *Proc Natl Acad Sci USA* 2011; 108: 17905-09.
- Red Cross (2015) About Heat Wave. <http://www.redcross.org/prepare/disaster/heat-wave> (consulté le 20 mars 2015).
- Revitch, B., Shaposhnikov, D. (2012) Climate change, heat and cold waves as risk factors of increased mortality in Russia. *Ecoforum* 2012; 2: 122-38.
- Rothfus, L.P. (1990) The Heat Index "Equation" (or, more than you ever wanted to know about heat index). Scientific Services Division, NWS Southern Region Headquarters, Fort Worth, Texas.

- Ryazantzev, S. (2011) Demographic and socio-economic consequences of heat wave and forest fires of 2010 in European Russia. *Ecol Life*; 5: 80–85.
- SACS (2006) Système d'alerte canicule et santé 2006, Rapport opérationnel de l'Institut national de veille sanitaire, disponible à : http://www.invs.sante.fr/publications/2006/sacs_2006/sacs2006.pdf (consulté le 25 mai 2015).
- Schaffer, A., Muscatello, D., Broome, R., Corbett, S., Smith, W. (2012) Emergency department visits, ambulance calls, and mortality associated with an exceptional heat wave in Sydney, Australia, 2011: a time-series analysis. *Environ Health*; 11(1):3.
- Semenza, J.C., Rubin, C.H., Falter, K.H., *et al.* (1996) Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago. *New England Journal of Medicine*; 335(2): 84–90.
- Semenza, J. C., McCullough J.E., Flanders W.D., McGeehin M.A., Lumpkin J.R. (1999) Excess hospital admissions during the July 1995 heat wave in Chicago. *American Journal of Preventive Medicine*, Vol. 16, No. 04, pp. 269–277.
- Santé Canada (2011) Lignes directrices à l'intention des travailleurs de la santé pendant les périodes de chaleur accablante: Un guide technique. Disponible sur : <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/climat/workers-guide-travailleurs/index-fra.php> (consulté le 14 mars 2015).
- Santé Canada (2012) Heat Alert and Response Systems to Protect Health: Best Practices Guidebook. Disponible à : <http://www.winnipeg.ca/emergweb/pdfs/HeatAndSunSafety/HARSGuidebook.pdf> (consulté le 20 mars 2015).
- Sheridan, S. (2002) Using a synoptic classification scheme to assess rural-urban differences in heat vulnerability. 13th Conference on Applied Climatology. Section 12.6
- Smith, T.T., Zaitchik, B.F., Gohlke, J.M. (2013) Heat waves in the United States: definitions, patterns and trends. *Climatic Change*, 118:811–825, DOI 10.1007/s10584-012-0659-2.
- Spagnolo, J., de Dear, R. (2003) A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney, Australia. *Build. Environ.*, 38, 721–738.
- State Government Victoria (2011) Heatwave Plan for Victoria: Protecting Health and Reducing Harm from Heatwaves. Disponible sur : [http://docs2.health.vic.gov.au/docs/doc/45C7A59BDE5B1E-95CA257A360015AAB5/\\$FILE/Heatwave%20plan%20for%20Victoria.pdf](http://docs2.health.vic.gov.au/docs/doc/45C7A59BDE5B1E-95CA257A360015AAB5/$FILE/Heatwave%20plan%20for%20Victoria.pdf) (consulté le 20 mai 2015).
- State Government Victoria (2014) Heat Health Alert System 2014–2015. Information and guidance for councils and stakeholders. Disponible sur : [http://docs2.health.vic.gov.au/docs/doc/479050E85C-879831CA257D8C0015FD87/\\$FILE/Heat%20health%20alert%20system_guidance%202014%20-%202015.pdf](http://docs2.health.vic.gov.au/docs/doc/479050E85C-879831CA257D8C0015FD87/$FILE/Heat%20health%20alert%20system_guidance%202014%20-%202015.pdf) (consulté le 20 mai 2015).
- Steadman, R.G. (1994) Norms of apparent temperature in Australia. *Aust Met Mag* 43: 1–16.
- Stephenson, D. B., Diaz, H. F., Murnane, R. J. (2008) Definition, diagnosis and origin of extreme weather and climate events. In: *Climate Extremes and Society* [R. J. Murnane, and H. F. Diaz (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 11–23.
- Stull, R. (2011) Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. *J Appl Meteorol Climatol* 50: 2267–2269.
- Stull, R. (2015) Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science and Meteorology for Scientists and Engineers, 3rd Edition, Dept. of Earth, Ocean & Atmospheric Sciences, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 924 p.
- Sun, X., Sun, Q., Yang, M., Zhou, X., Li, X., Yu, A., Geng, F., Guo, Y. (2014) Effects of temperature and heat waves on emergency department visits and emergency ambulance dispatches in Pudong New Area, China: a time series analysis. *Environ Health*, Oct 2;13:76.
- Tairou, F. O., Bélanger D., Gosselin, P. (2010) Proposition d'indicateurs aux fins de vigilance et de surveillance des troubles de la santé liés à la chaleur, Institut national de santé publique du Québec, Institut national de santé publique du Québec.
- Thom, E. C. (1959) The discomfort index. *Weatherwise*, 12, 57–60.
- Thornton, P.E., Running, S.W., White, M.A. (1997) Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *Journal of Hydrology*, 190: 214–251.
- Thornton, P.E., Running, S.W. (1999) An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93: 211–228.
- Thornton, P.E., Thornton, M.M., Mayer, B.W., Wilhelm, N., Wei, Y., Devarakonda, R., Cook, R.B. (2014) Daymet: Daily Surface Weather Data on a 1-km Grid for North America, Version 2. Data set. Available on-line [<http://daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA. Date accessed: YYYY/MM/DD. Temporal range: YYYY/MM/DD–YYYY/MM/DD. Spatial range: N=DD.DD, S=DD.DD, E=DDD.DD, W=DDD.DD. <http://dx.doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1219>
- Tong, S., Wang, X., Barnett, A. (2010) Assessment of heat-related health impacts in Brisbane, Australia: comparison of different heatwave definitions. *PLoS One* 5: e12155.
- Toutant, S., Gosselin, P., Belanger, D., Bustinza, R., Rivest, S. (2011) An open source Web application for the surveillance and prevention of the impacts on public health of extreme meteorological events: the SUPREME system. *International Journal of Health Geographics*, 10: 39. En ligne : <http://www.ij-healthgeographics.com/content/10/1/39/abstract>
- Vandentorren, S., Bretin, P., Zeghnoun, A., Mandereau-Bruno, L., Croisier, A., Cochet, C., Riberon, J., Siberan, I., Declercq, B., Ledrans, M. (2006) August 2003 heat wave in France: risk factors for death of elderly people living at home. *Eur J Public Health*, Vol. 16, No. 6, pp. 583–591. DOI: 10.1093/eurpub/ckl063
- Vaneckova, P., Neville, G., Tippet, V., Aitken, P., FitzGerald, G., Tong, S. (2011) Do Biometeorological Indices Improve Modeling Outcomes of Heat-Related Mortality? *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 1165–1176. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/2011JAMC2632.1>
- Watkins, R., Palmer, J., Kolokotroni, M. and Littlefair, P. (2002) The London Heat Island: results from summertime monitoring. *Building Serv. Eng. Technol.*, 23, 2, pp. 97–106.
- Watts, N. *et al.* (2015) Health and climate change: policy responses to protect public health. *The Lancet*, En ligne : [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)60854-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(15)60854-6)
- Willett K.M., Sherwood S. (2012) Exceedance of heat index thresholds for 15 regions under a warming climate using the wet-bulb globe temperature. *Int J Climatol* 32:161–177.
- WMO (2015) Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development. WMO – No. 1142
- Yap, D., Oke, T.R. (1974) Sensible heat fluxes over an urban area – Vancouver, B.C., *J. App. Met.*, 13, 880–890.
- Zacharias, S., Koppe, C., Mücke, H-G. (2014) Influence of Heat Waves on Ischemic Heart Diseases in Germany. *Climate*, 2, 133–152; DOI: 10.3390/cli2030133.
- Zander, K.K. *et al.* (2015) Heat stress causes substantial labour productivity loss in Australia. *Nature Climate Change*, DOI: 10.1038/nclimate2623.
- Zhang, X., *et al.* (2011) Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdis. Rev. Clim. Change*, 2, 851–870.

Annexes

Annexe A. Définition et calcul de l'indice humidex

L'indice humidex est une innovation canadienne, d'abord utilisé en 1965 et développé à Environnement et Changement climatique Canada par Masterson et Richardson (1979). Il a été conçu par les météorologues canadiens pour décrire la manière dont le temps chaud et humide est ressenti ou est perçu par une personne normale. L'humidex combine la température et l'humidité en une seule valeur (sans unité) afin de refléter la température perçue par l'être humain. Parce qu'il prend en compte les deux plus importants facteurs qui influent sur le confort ou le degré d'inconfort pour l'être humain en été, il peut être une meilleure mesure de comment l'air devient « étouffant » ou est ressenti comme tel par le corps humain, qu'il ne l'est en ne considérant que la température ou l'humidité seule.

En utilisant la pression partielle de vapeur d'eau, on peut calculer la valeur quotidienne de l'indice humidex suivant la formule :

$$\text{Humidex } (H) = T + 5/9(e - 10)$$

Avec, T la température (moyenne) de l'air en degrés Celsius et e la pression partielle de vapeur d'eau en hPa. On calcule la température moyenne quotidienne (valeur de T) à partir des températures minimale et maximale quotidiennes (T_{\min} et T_{\max} , respectivement) :

$$T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}$$

Si la pression partielle de vapeur d'eau n'est pas disponible (comme variable directe mesurée ou simulée), elle peut être calculée en utilisant l'humidité relative (HR) et la pression de vapeur saturante e_{sat} de l'air en hPa :

$$e = \left(\frac{HR}{100} \right) \times e_{\text{sat}}$$

On peut utiliser une approximation polynomiale pour calculer la pression de vapeur saturante (telle que suggérée par Lowe, 1977). La température de l'air TT doit être comprise entre $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour utiliser cette approximation, via la formule suivante :

$$e_{\text{sat}} = a_0 + T \times \left(a_1 + T \times \left(a_2 + T \times \left(a_3 + T \times \left(a_4 + T \times (a_5 + T \times a_6) \right) \right) \right) \right)$$

Avec,

- $a_0 = 6.107799961$
- $a_1 = 4.436518521 \times 10^{-1}$
- $a_2 = 1.428945805 \times 10^{-2}$
- $a_3 = 2.650648471 \times 10^{-4}$
- $a_4 = 3.031240396 \times 10^{-6}$
- $a_5 = 2.034080948 \times 10^{-8}$
- $a_6 = 6.136820929 \times 10^{-11}$

L'humidex est largement utilisé au Canada. Cependant, des valeurs extrêmement élevées de l'indice humidex sont rares sauf dans les régions du sud de l'Ontario, du Manitoba et du Québec. L'humidex diminue généralement alors que la latitude augmente. De toutes les villes canadiennes, Windsor (Ontario) a eu la plus haute mesure humidex enregistré soit de 52,1 le 20 juin 1953 (Source : Environnement et Changement climatique Canada, 2015). Les masses d'air chaude et humide qui causent ces valeurs d'humidex élevées sont le plus souvent originaires du golfe du Mexique ou des Caraïbes (www.ec.gc.ca/meteo-weather, en recherchant *Tableau de l'humidex*). Dans le *Tableau A.1* ci-dessous, les valeurs de l'humidex sont présentées en fonction des valeurs de l'humidité relative et de la température de l'air. Selon ces valeurs, des degrés d'inconfort varient selon les seuils établis (valeurs selon les codes de couleur mis au *Tableau A.1*).

TABLEAU A.1. Intervalle de valeurs de l'humidex selon les valeurs de l'humidité relative et de la température et le degré de confort associé.

TABLEAU DE L'HUMIDEX – LÉGENDE	
Humidex	Degré de confort
20 à 29	Aucun inconfort
30 à 39	Un certain inconfort
40 à 45	Beaucoup d'inconfort: évitez les efforts
46 et plus	Danger: coup de chaleur possible

HUMIDEX POUR L'HUMIDITÉ RELATIVE DE 100 % À 65 %		Utilisez la légende.							
Humidité relative		100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%
Température (°C)	21 °C	29	29	28	27	27	26	26	24
	22 °C	31	29	29	28	28	27	26	26
	23 °C	33	32	32	31	30	29	28	27
	24 °C	35	34	33	33	32	31	30	29
	25 °C	37	36	35	34	33	33	32	31
	26 °C	39	38	37	36	35	34	33	34
	27 °C	41	40	39	38	37	36	35	34
	28 °C	43	42	41	41	39	38	37	36
	29 °C	46	45	44	43	42	41	39	38
	30 °C	48	47	46	44	43	42	41	40
	31 °C	50	50	48	46	45	44	43	41
	32 °C	52	51	50	49	47	46	45	43
	33 °C	55	54	52	51	50	48	47	46
	34 °C	58	57	55	53	52	51	49	48
	35 °C		58	57	56	54	52	51	49
	36 °C			58	57	56	54	53	51
	37 °C					58	57	55	53
	38 °C							57	56

Source : www.ec.gc.ca/meteo-weather, en recherchant *Tableau de l'humidex*

Annexe B. Le système SUPREME (SURveillance et PRévention des Événements Météorologiques Extrêmes)

CONTEXTE

Les responsables en santé publique ont besoin d'avoir accès à de l'information fiable et opportune pour pouvoir déclencher les étapes d'intervention en cas d'événement météorologique extrême. Les DSP doivent prendre promptement des décisions, basées sur un éventail d'informations qui ne sont pas toujours rapidement disponibles, et provenant de plusieurs sources. En 2009, dans une analyse de besoins, les DSP ont déclaré avoir un intérêt particulier pour un système d'information leur permettant d'avoir, au même endroit, toute l'information nécessaire pour prendre des décisions éclairées quant au déclenchement des activités de prévention des impacts liés aux événements météorologiques extrêmes.

OBJECTIFS

Les objectifs du système sont :

- La production de connaissances de pointe en matière d'évaluation d'impacts sanitaires liés aux événements météorologiques extrêmes,
- La mise à disposition d'une source d'information fiable et constamment mise à jour permettant aux décideurs de prendre des décisions éclairées en matière d'intervention lors d'événements météorologiques extrêmes,
- La limitation des impacts sanitaires des événements météorologiques extrêmes. L'amélioration de la surveillance des événements météorologiques extrêmes devrait permettre de limiter les maladies, blessures, décès et troubles psychosociaux liés à ces événements. Par exemple, notre objectif de santé publique est que les excès de décès dans une région touchée ne devraient pas excéder de plus de 30 % les taux de mortalité historiques pour les périodes similaires des années précédant la vague de chaleur, et
- La stimulation d'une collaboration plus étroite avec les partenaires clés permettant l'amélioration du système de surveillance.

LE SYSTÈME

Le portail du système SUPREME présente un ensemble d'informations et d'indicateurs pouvant s'avérer utiles aux répondants régionaux ou ministériels pour les interventions à venir. SUPREME a été développé sur des logiciels libres ou à code source ouvert (open source) qui comptent une communauté de développement importante et sont très matures (Bustanza *et al.*, 2011; Toutant *et al.*, 2011). En outre, les données disponibles proviennent de sources multiples : divers ministères provinciaux et fédéraux, organisations gouvernementales, sociétés d'État, etc. SUPREME utilise les Web services, qui effectuent une requête spécifique là où se trouvent les données. Ainsi, chacun demeure propriétaire de ses données et est responsable de leur mise à jour, et y donne librement accès à ses partenaires. Les données cartographiques de base sont paramétrées pour faciliter la rapidité des temps de réponse.

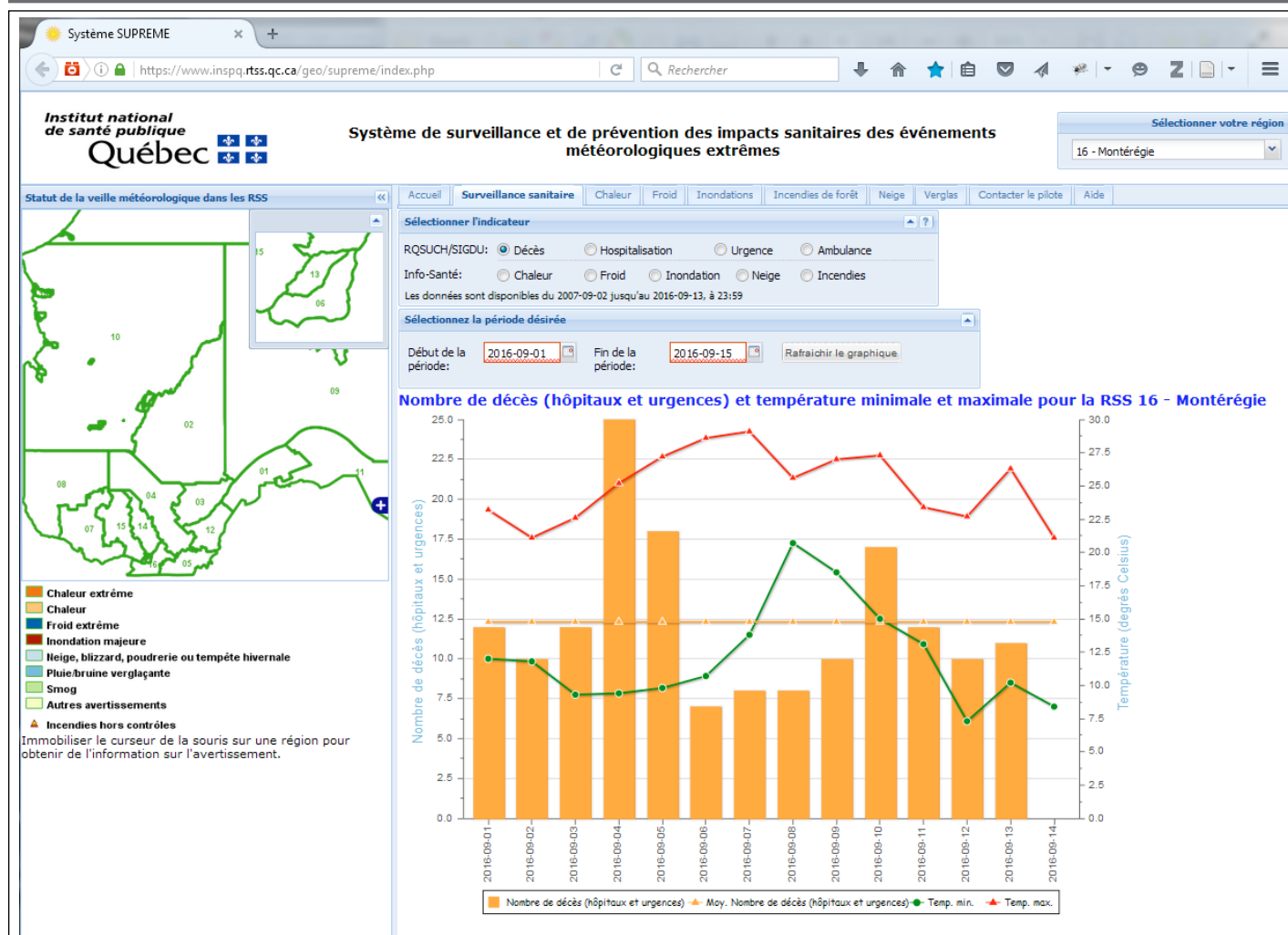
Mis en opérationnel en mai 2010, SUPREME donne accès à plusieurs indicateurs qui portent sur :

- L'exposition aux aléas (températures, îlots de chaleur, humidité, précipitations, incendies de forêt en activité, indice de danger d'incendie, zones à risque d'inondation, zones inondées, concentration de polluants dans l'air, etc.),
- Les caractéristiques socio-économiques des quartiers (densité de population, indice de défavorisation, conditions des logements, niveaux de climatisation, localisation des piscines, haltes climatisées, hébergements temporaires en cas de sinistre, garderies, établissements de santé, et habitations à loyer modique, etc.),

- Les problèmes de santé (décès, admissions à l'urgence, hospitalisations, transports ambulanciers, indice de multimorbidité chronique, consommation de services de santé), et
- Le suivi de la situation pendant et après l'intervention par les équipes de terrain.

Plusieurs de ces indicateurs sont disponibles en temps réel ou quasi réel, dont les indicateurs de santé au niveau régional ou les températures observées (*Figure B.1*).

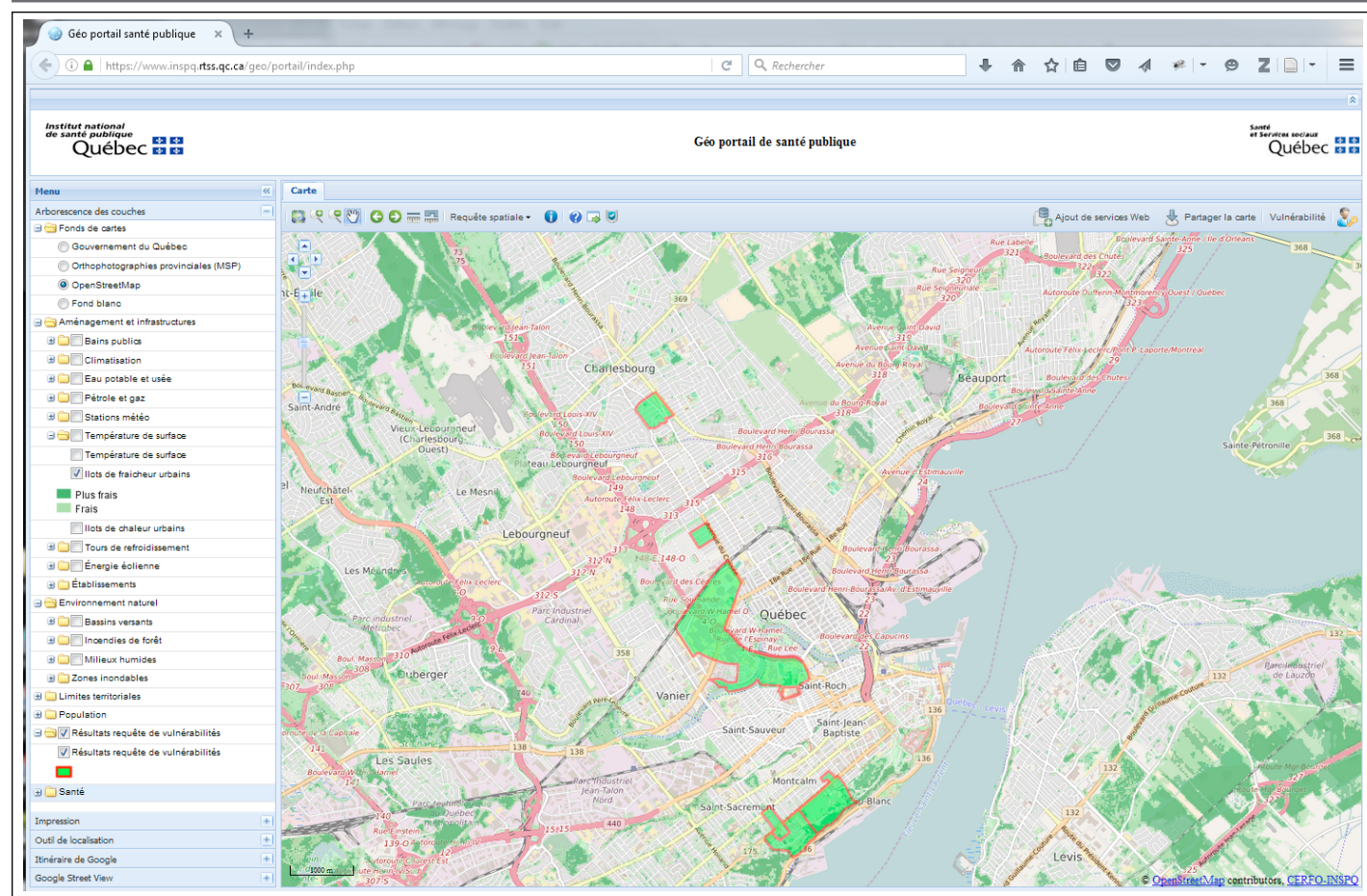
Figure B.1. Onglet « Surveillance sanitaire » du système SUPREME.



Les utilisateurs de SUPREME qui le demandent peuvent recevoir par courrier électronique, 24 heures par jour et 7 jours par semaine, des avertissements automatisés de chaleur extrême, de froid extrême, d'inondation majeure, de neige abondante, de pluie verglaçante, de smog, etc., lorsque certains seuils sont atteints.

L'application cartographique de SUPREME permet, par ailleurs, de faire des requêtes de vulnérabilité à un aléa donné (Figure B.2), en paramétrant certains indicateurs qui permettent de cibler l'unité territoriale de base du recensement, soit 700 personnes en moyenne.

Figure B.2. Exemple d'une requête de vulnérabilité de l'application cartographique.



Un groupe d'utilisateurs a été créé pour orienter le système, proposer des ajustements, et approuver les modifications. Le groupe est composé principalement de représentants des équipes régionales de santé environnementale et du MSSS, de professionnels de la sécurité civile et de l'INSPO. Des interactions constantes avec le SMC et le MSP font aussi partie de la démarche, et des adaptations sont faites au fur et à mesure des évolutions des systèmes d'information de nos partenaires.

Depuis 2011, le système SUPREME a été évalué à deux reprises par les utilisateurs. Globalement, SUPREME est considéré comme un outil performant et il est très apprécié. Au Québec, le système représente, actuellement, la seule source commune d'information pertinente au niveau provincial pour divers aléas météorologiques extrêmes. Il regroupe, en un seul lieu, l'information rigoureuse et fiable, et il permet aussi de connaître l'état de la situation des autres régions lorsque des travaux de coordination interrégionaux sont nécessaires.

Annexe C. Climatologie (1981-2010) mensuelle des températures minimales, maximales et moyennes quotidiennes et leurs écarts types intra-mensuels (juin, juillet et août)

Figure C.1

Climatologie de la moyenne mensuelle sur la période 1981-2010 de Tmin (panneaux de gauche) et de Tmax (panneaux de droite) pour les mois de juin, juillet et août (panneaux du haut en bas, respectivement). Les données quotidiennes utilisées sont fournies sur une projection Lambert conique conforme avec une résolution d'arc de 5 minutes d'arc (≈ 10 -km) et développées sous forme de grille à partir des données de stations d'observations d'Environnement et Changement climatique Canada par le Dr. McKenney du Service Canadien des Forêts (Ressources Naturelles Canada; Hutchinson et al., 2009; Hopkinson et al., 2011; McKenney et al., 2011).

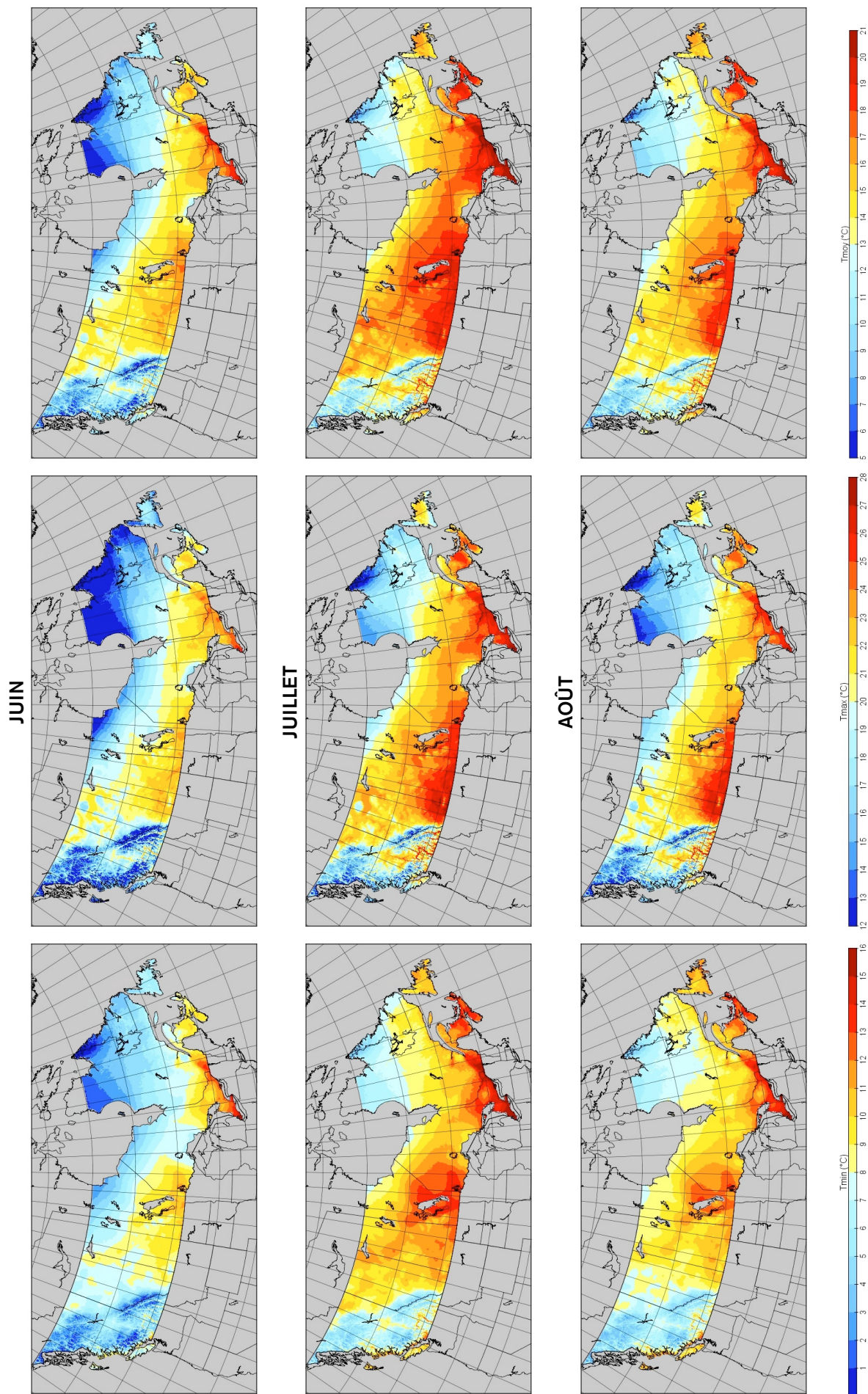
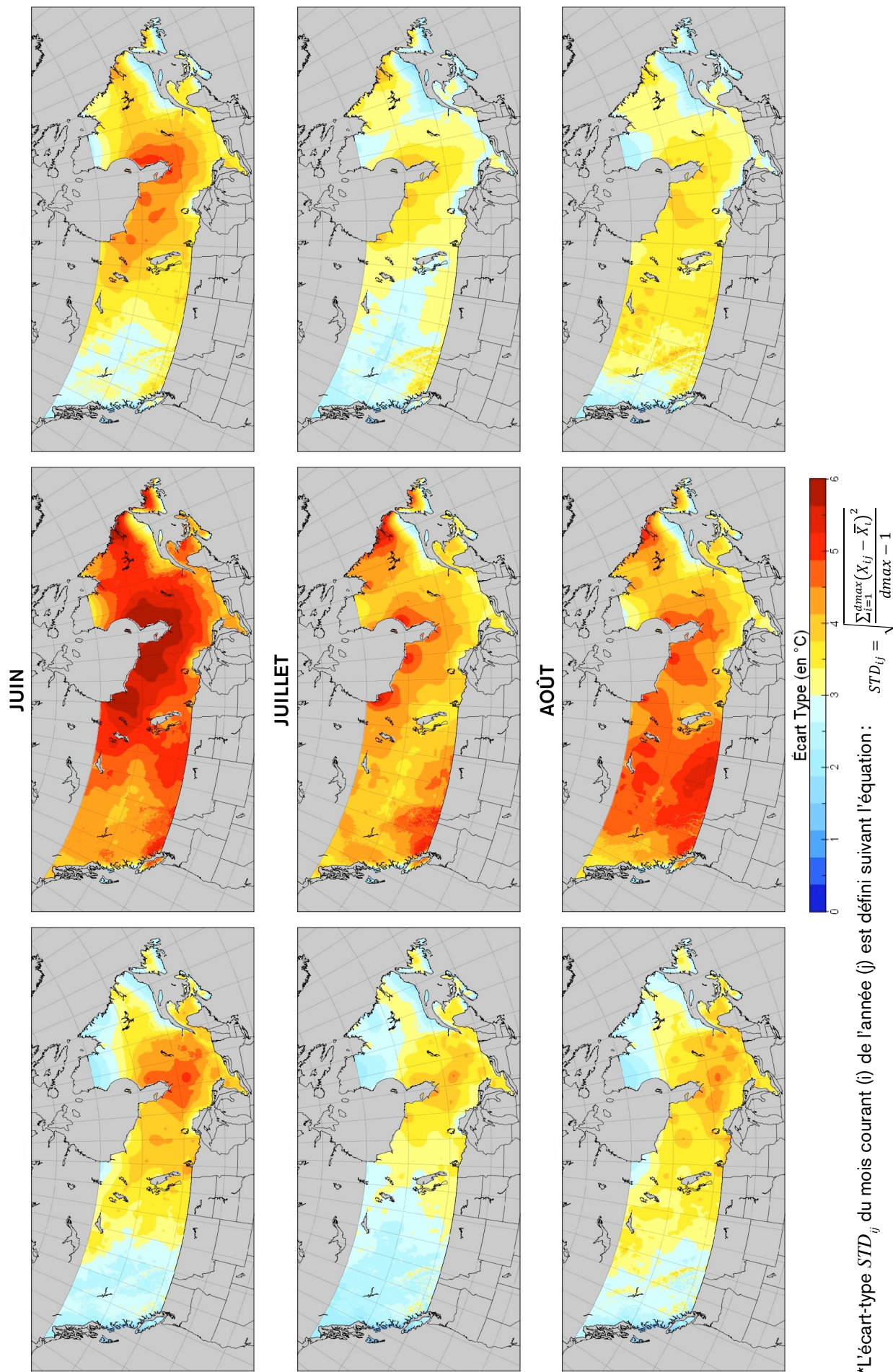


Figure C.2 Climatologie de l'écart-type* intra-mensuel utilisant la climatologie (1981-2010) du jour julien de Tmin/Tmax/Tmoy (panneaux de gauche/centre/droite) pour les mois de juin, juillet et août (panneaux du haut en bas, respectivement). Les données utilisées sont les mêmes que pour la Figure C.1.



Où \bar{X}_j correspond à Tmin/Tmax du mois (i) de l'année (j) et (X_j) la moyenne climatologique du jour julien pour la période normale 1981-2010 du mois considéré (i) de la température minimale/maximale journalière. $dmax$ est le nombre maximal de jours du mois (i).

Annexe D. Climatologie (1981-2010) des canicules utilisant plusieurs définitions (cf. section 4)

Figure D.1 Climatologie saisonnière (en été, JJA) des canicules (en nombre de séquences moyennes sur 30 ans) suivant différentes durées (3 et 6 jours consécutifs, panneaux de gauche et de droite, respectivement) avec plusieurs seuils de Tmax ($\geq 3^\circ\text{C}$, 5°C , et 90e centile du Tmax, c.-à-d. Tmax90p, par rapport aux valeurs climatologiques de référence 1981-2010, panneaux de haut en bas, respectivement). Ces indices de vagues de chaleur ont été développés à partir des mêmes données utilisées à la Figure C.1 (Annexe C).

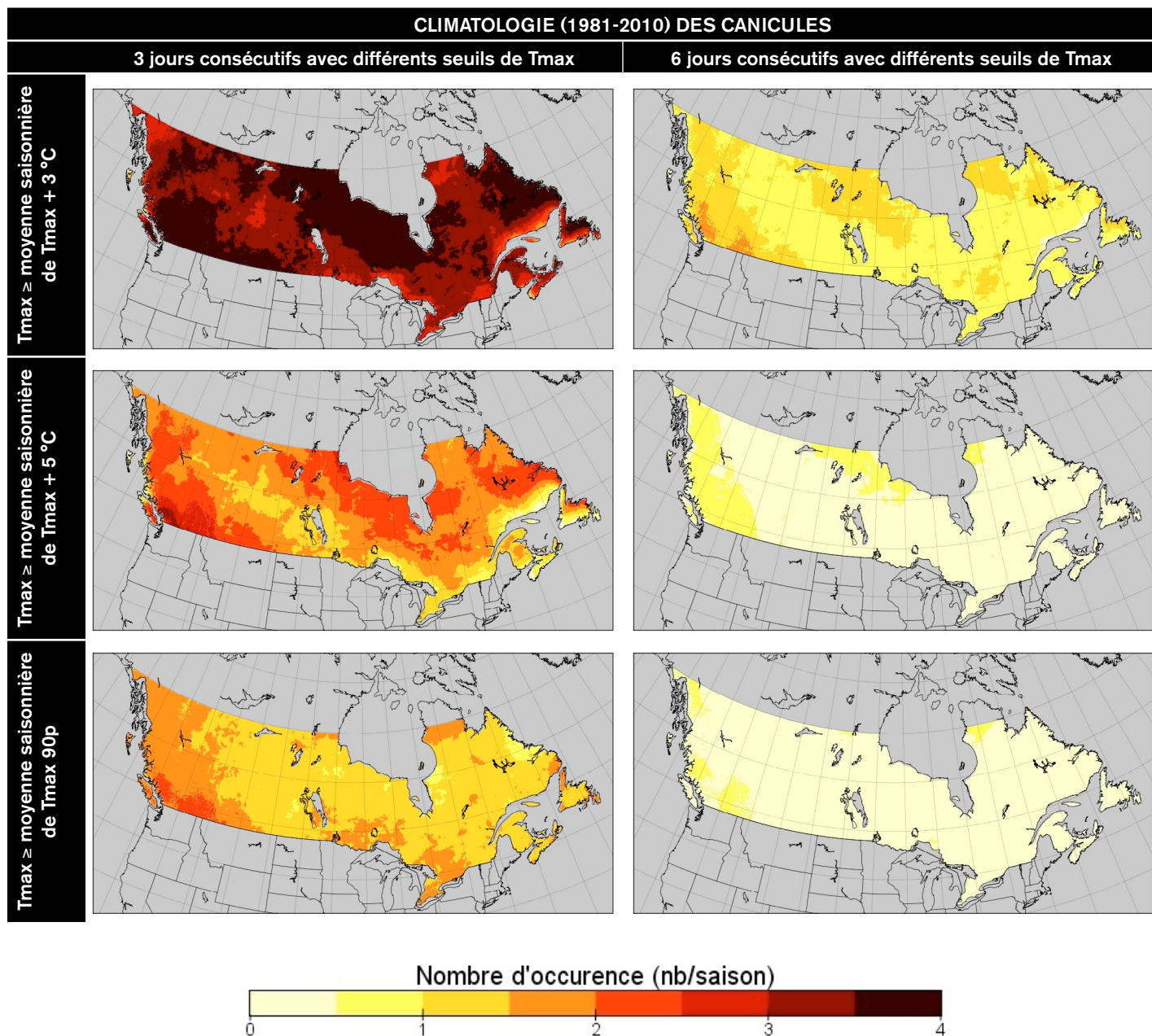
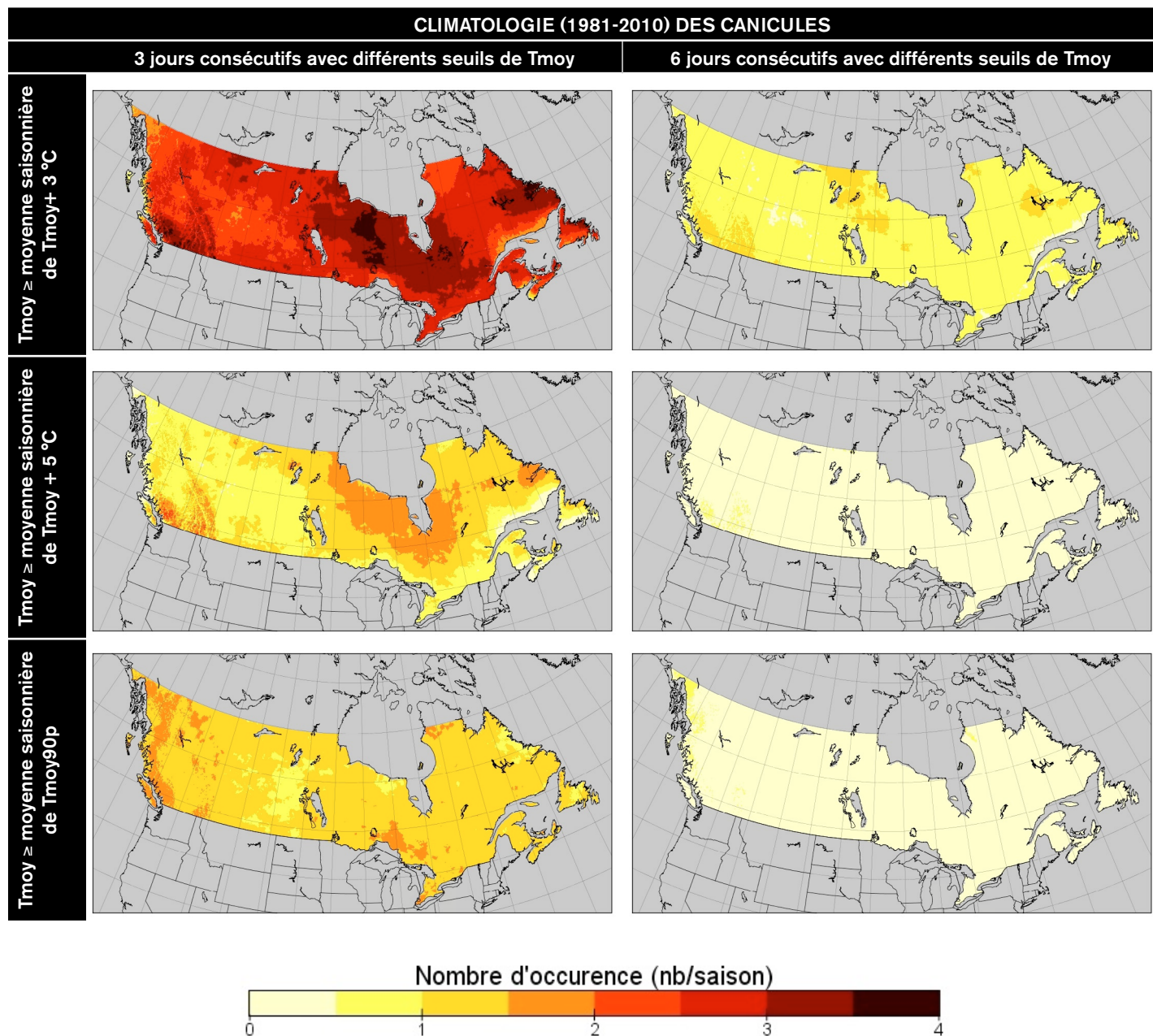


Figure D.2 Climatologie saisonnière (en été, JJA) des canicules (en nombre de séquences moyennes sur 30 ans) suivant différentes durées (3 et 6 jours consécutifs, panneaux de gauche et de droite, respectivement) avec plusieurs seuils de T_{moy} ($\geq 3^\circ\text{C}$, 5°C , et 90e centile du T_{moy} , c.-à-d. T_{moy90p} , par rapport aux valeurs climatologiques de référence 1981-2010, panneaux de haut en bas, respectivement). Ces indices de vagues de chaleur ont été développés à partir des mêmes données utilisées à la Figure C.1 (Annexe C).



Annexe E. Seuils d'avertissements de chaleur extrême au Québec

TABLEAU E.1. Seuils d'avertissements de chaleur extrême au Québec, selon les autorités de santé publique et selon les Régions sociosanitaires du Québec (RSS).

RSS		COEFFICIENTS DE PONDÉRATION (j1 – j2 – j3)	SEUILS	
			T max (°C)	T min (°C)
Classe 1				
RSS 01	Bas-Saint-Laurent	0,4 – 0,4 – 0,2	31	16
RSS 02	Saguenay–Lac-Saint-Jean			
RSS 03	Capitale Nationale			
RSS 08	Abitibi-Témiscamingue			
RSS 09	Côte-Nord			
RSS 10	Nord du Québec			
RSS 11	Gaspé–Îles-de-la-Madeleine			
Classe 2				
RSS 04	Mauricie et Centre du Québec	0,5 – 0,5	31	18
RSS 05	Estrie			
RSS 07	Outaouais			
RSS 12	Chaudière-Appalaches			
RSS 15	Laurentides 1 (Parc du Mont-Tremblant, Mont-Laurier)			
Classe 3				
RSS 06/13	Montréal/Laval	0,4 – 0,4 – 0,2	33	20
RSS 14	Lanaudière			
RSS 15	Laurentides 2 (Laurentides, Lachute – Saint-Jérôme)			
RSS 16	Montréal			

Annexe F. Climatologie actuelle (1971-2000) et future (2041-2070 et 2071-2100) et anomalies futures (2050s et 2080s vs 1980s) des vagues de chaleur selon les critères multivariés (issus de la classe 3 des RSS présentée au Tableau E.1, Annexe E)

Figure F.1.

Moyennes et anomalies climatologiques (de mai à septembre) du nombre de vagues de chaleur (nombre d'occurrences par année en moyenne) en utilisant au moins 3 jours consécutifs où $T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$, $T_{max} \geq 33^{\circ}\text{C}$ et Humidex ≥ 40 (conjointement le même jour) pour l'Amérique du Nord pour a) la période actuelle (1971-2000), et b) les périodes futures (2041-2070 panneau du haut, et 2071-2100 panneau du bas) et c) les anomalies futures (2041-2070 – 1971-2000 panneau du haut, et 2071-2100 – 1971-2000 panneau du bas). Ces valeurs correspondent à la moyenne d'ensemble de 7 ou 6 simulations de modèles régionaux du climat (les détails sur ces modèles sont fournis au Tableau F.1) pour la période actuelle ou future (respectivement) à partir des données disponibles dans le cadre du projet CORDEX (<https://na-cordex.org/simulation-matrix>). Pour le futur, le scénario RCP8.5 est utilisé. Les seuils de T_{min}/T_{max} utilisés s'inspirent du Tableau E.1 (Annexe E).

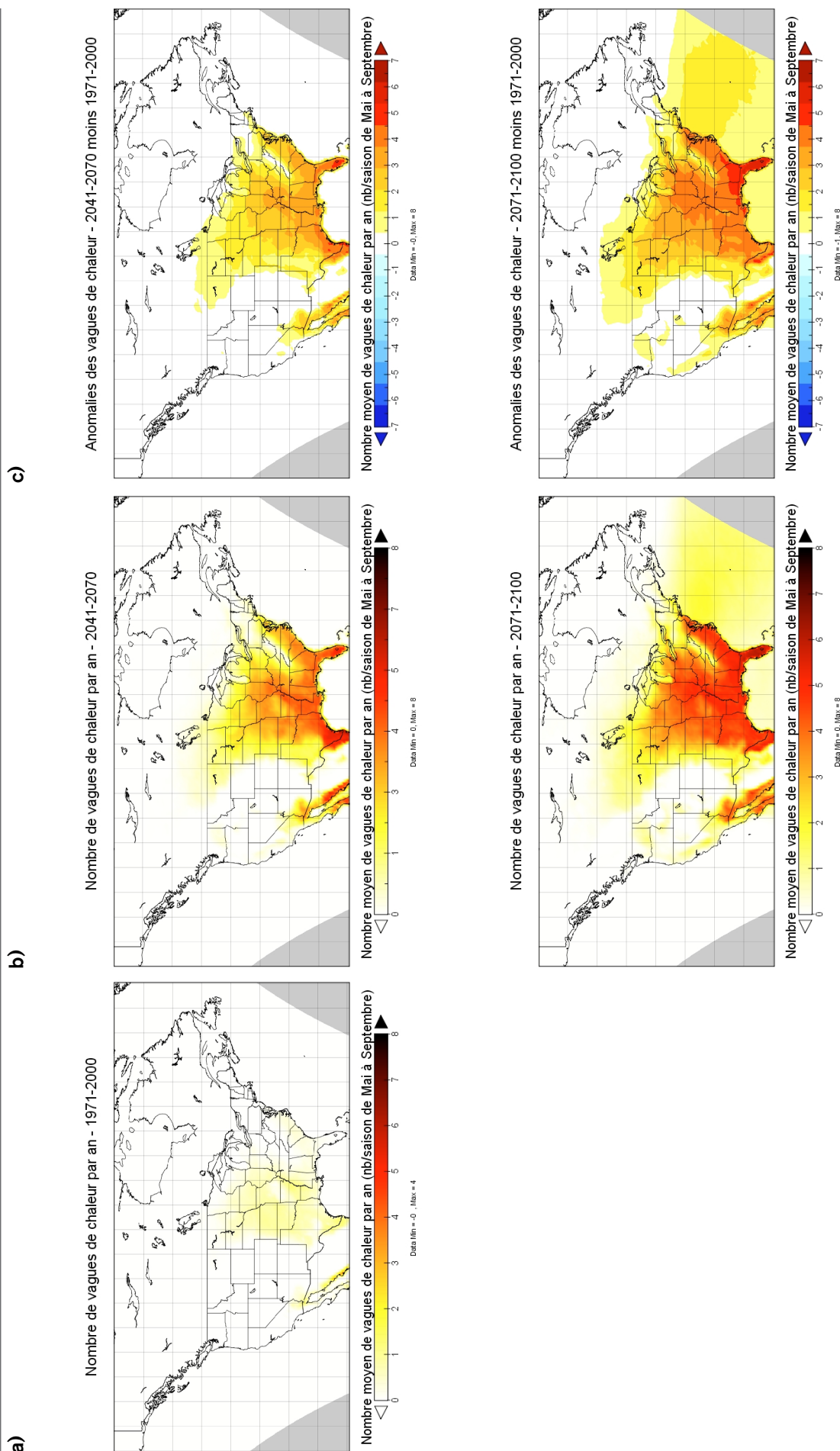


Figure F.2. Climatologie des vagues de chaleur (période mai à septembre au Canada et aux USA), en utilisant les seuils de Tmin/Tmax et les mêmes durées que ceux utilisés à la *Figure F.1* (i.e. pas l'humidex car non disponible), reconstituées à partir de la base de données ANUSPLIN (Canada, cf. *Annexe C, Figure C.1*) et issues du North American Land Data Assimilation System (NLDAS, USA). Plus de détails sur les données NLDAS sont disponibles à : <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nldas-north-american-land-data-assimilation-system-monthly-climatologies>, et dans l'étude de Maurer *et al.* (2002).

Nombre moyen de vagues de chaleur par an - Données observées ANUSPLIN/NLDAS (1981-2010)

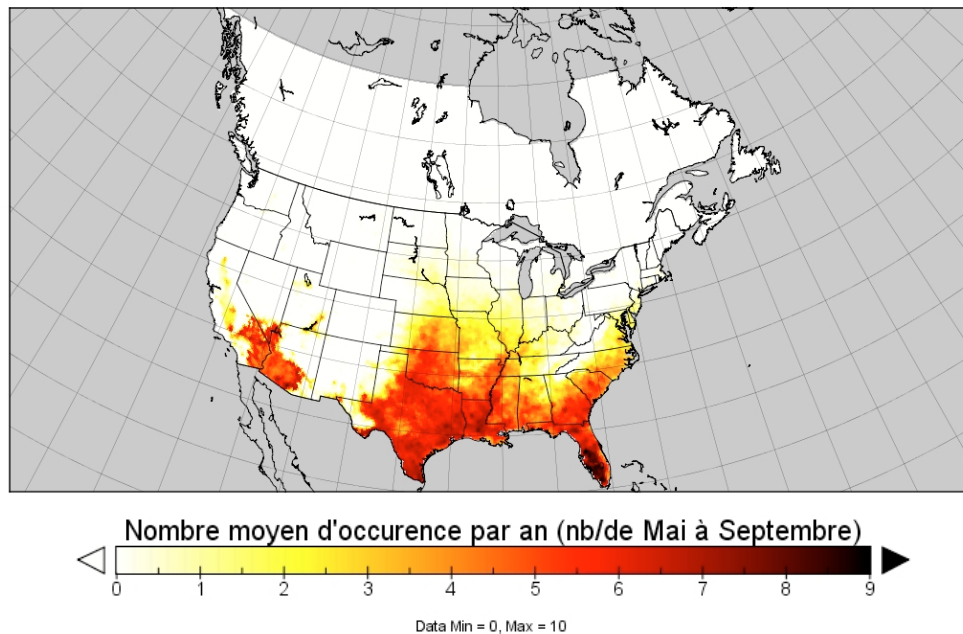


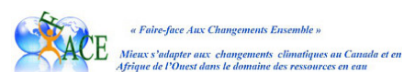
TABLEAU F.1. Ensemble des modèles régionaux pilotés par des modèles globaux sur les périodes actuelles et futures disponibles via le projet CORDEX et utilisées pour produire l'information présentée à la Figure F.1. La description détaillée de la taille du domaine, les principales caractéristiques des modèles, le type de projection et la période d'analyse sont brièvement décrits. Les références et la documentation concernant ces modèles régionaux du climat sont disponibles sur le site web du projet CORDEX Amérique du Nord : <https://na-cordex.org/simulation-matrix>

	UQAM-CRCM5	CCMA-CANRCM4	DMI-HIRHAM5-V2	SMHI-RCA4-V1
Institution en charge du modèle	Université du Québec à Montréal, Canada	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Victoria, Canada	Danish Meteorological Institute	Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
Acronyme	CRCM5-V1	CANRCM4	HIRHAM5-V2	RCA4-V1
Pilote / période de simulation	CanESM2: 1971-2000	CanESM2: 1971-2000	ICHEC-EC-EARTH: 1971-2000	CanESM2: 1971-2000
	MPH-ESM-LR: 1971-2000	CanESM2_rcp45: 2041-2070	ICHEC-EC-EARTH_rcp45: 2041-2070	ICHEC-EC-EARTH: 1971-2000
	CanESM2_rcp45: 2041-2070			CanESM2_rcp45: 2041-2070
	MPH-ESM-LR_rcp45: 2041-2070			ICHEC-EC-EARTH_rcp45: 2041-2070
Projection et résolution	Rotated pole 0.44	Rotated pole 0.44	Rotated pole 0.44	Rotated pole 0.44
Schéma convectif	Kain and Fritsch (1990) Kuo (1965)	Zhang and McFarlane (1995)	Tiedtke (1989)	Kain and Fritsch (1990, 1993)
Schéma radiatif	Li and Barker (2005)	Li and Barker (2005), Barker <i>et al.</i> (2008) Pincus <i>et al.</i> (2003)	Fouquart and Bonnel (1980) Mlawer <i>et al.</i> (1997)	Savijarvi (1990) Sass <i>et al.</i> (1994)
Diffusion de la turbulence verticale	Benoit <i>et al.</i> (1989) Delage et Girard (1992) Delage (1997)	Abdella and McFarlane (1997); von Salzen <i>et al.</i> (2013)	Louis (1979)	Cuxart <i>et al.</i> (2000)
Schéma microphysique	Sundqvist <i>et al.</i> (1989)	von Salzen and McFarlane (2002), von Salzen <i>et al.</i> (2013)	Tiedtke (1989), Tompkins (2002)	Rasch and Kristjansson (1998)
Schéma de surface	CLASS 3.5, Verseghy (2000)	CLASS 2.7	Schulz <i>et al.</i> (1998) Hagemann (2002)	Samuelsson <i>et al.</i> (2006)

Références

- Abdella K, McFarlane N (1997) Parameterization of the surface layer exchange coefficients for atmospheric models. *J Atmos Sci* 54: 1850–1867.
- Barker HW, Cole JNS, Morcrette J-J, Pincus R, Raisanen P, von Salzen K, Vaillancourt PA (2008) The Monte Carlo independent column approximation an assessment using several global atmospheric models. *QJR Meteorol Soc* 134: 1463–1478.
- Benoit R, Cote J, Mailhot J (1989) Inclusion of a TKE boundary layer parameterization in the Canadian regional finite-element model. *Mon Weather Rev* 117: 1726–1750.
- Cuxart J, Bougeault P, Redelsperger J-L (2000) A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations. *QJR Meteorol Soc* 126: 1–30.
- Delage Y (1997) Parameterising sub-grid scale vertical transport in atmospheric models under statically stable conditions. *Bound Layer Meteorol* 82: 23–48.
- Delage Y, Girard C (1992) Stability functions correct at the free convection limit and consistent for both the surface and Ekman layers. *Bound Layer Meteorol* 58: 19–31.
- Fouquart Y, Bonnel B (1980) Computations of solar heating of the earth's atmosphere: a new parameterization. *Beitr Phys Atmos* 53: 35–62.
- Hagemann S (2002) An improved land surface parameter dataset for global and regional climate models. *MPI Rep* 336: 21.
- Kain JS, Fritsch JM (1990) A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J Atmos Sci* 47: 2784–2802.
- Kain JS, Fritsch JM (1993) Convective parameterization for mesoscale models: the Kain–Fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models. *Meteorological monography*, No. 24, American Meteorological Society, pp 165–170.
- Kuo HL (1965) On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. *J Atmos Sci* 22: 40–63.
- Li J, Barker HW (2005) A radiation algorithm with correlated k-distribution. Part I: local thermal equilibrium. *J Atmos Sci* 62: 286–309.
- Louis, J. F. (1979) A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Bound.-Layer Meteor.*, 17, 187–202.
- Mlawer EJ, Taubman SJ, Brown PD, Iacono MJ, Clough SA (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J Geophys Res* 102: 16663–16682.
- Pincus R, Barker HW, Morcrette J-J (2003) A fast, flexible, approximate technique for computing radiative transfer in inhomogeneous cloud fields. *J Geophys Res*. doi:10.1029/2002JD003322.
- Rasch PJ, Kristjánsson JE (1998) A comparison of the CCM3 model climate using diagnosed and predicted condensate parameterizations. *J Clim* 11: 1587–1614.
- Samuelsson P, Gollvik S, Ullerstig A (2006) The land-surface scheme of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3). *SMHI Rep. Met.* 122. 25 pp.
- Sass BH, Rontu L, Savijärvi H, Räisänen P (1994) HIRLAM-2 radiation scheme: documentation and tests. *SMHI HIRLAM technical report* 16, 43 pp.
- Savijärvi H (1990) A fast radiation scheme for mesoscale model and short-range forecast models. *J Appl Meteorol* 29: 437–447.
- Schulz, J.-P., L. Du“menil, J. Polcher, C. A. Schlosser, and Y. Xue (1998) Land surface energy and moisture fluxes: Comparing three models. *J. Appl. Meteor.*, 37, 288–307.
- Sundqvist H, Berge E, Kristjánsson JE (1989) Condensation and cloud parameterization studies with a mesoscale numerical weather prediction model. *Mon Weather Rev* 117: 1641–1657.
- Tiedtke M (1989) A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon Weather Rev* 117: 1779–1800.
- Tiedtke M (1993) Representation of clouds in large-scale models. *Mon Weather Rev* 121: 3040–3061.
- Tompkins AM (2002) A prognostic parameterization for the subgrid-scale variability of water vapor and clouds in large-scale models and its use to diagnose cloud cover. *J Atmos Sci* 59: 1917–1942.
- Verseghy DL (2000) The Canadian Land Surface Scheme (CLASS): its history and future. *Atmos Ocean* 38: 1–13.
- von Salzen K, McFarlane NA (2002) Parameterization of the bulk effects of lateral and cloud-top entrainment in transient shallow cumulus clouds. *J Atmos Sci* 59: 1405–1429.
- von Salzen K, Scinocca JF, McFarlane NA, Li J, Cole JNS, Plummer D, Reader MC, Ma X, Lazare M, Solheim L (2013) The Canadian fourth generation atmospheric global climate model (CanAM4). Part I: representation of physical processes. *Atmos Ocean* 51(1): 104–125. doi:10.1080/07055900.2012.755610.
- Zhang GJ, McFarlane NA (1995) Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the CCC-GCM. *Atmos Ocean* 3: 407–446.

Le travail d'édition a été réalisé par le service des communications de l'UQAM
avec la contribution financière d'Environnement et Changement climatique Canada



Environnement et
Changement climatique Canada

Environment and
Climate Change Canada



Santé
Canada

Health
Canada

ISBN: 978-2-924777-01-5, format imprimé, Septembre 2016
ISBN: 978-2-924777-00-8, format PDF, Septembre 2016